Ferdowsi Civil Engineering, 36, 4, 2024. (19-44)

Ferdowsi University of Mashhad

Ferdowsi Civil Engineering

https://civil-ferdowsi.um.ac.ir

Iranian Concrete Institute

Pavement Engineering Association of Iran

Effect of Boundary Conditions on the Seismic Performance of Out-of-Plane Masonry Infills by Considering In-Plane Behavior Interaction

Research Article

Delaram Ostad[1], Jalil Shafaei[2]

DOI: 10.22067/JFCEI.2024.79409.1187

1- Introduction

Infill masonry walls are widely used for interior partitions and exterior walls in reinforced concrete (RC) structures in many parts of the world. On the other hand, frame structures with ordinary solid masonry infill were often found to have a poor deformation capacity. Serious damage and loss of the stability of many masonry infill walls have been reported during recent earthquakes. The capacity of masonry infills is defined in two distinct modes, namely in-plane force and out-of-plane force. There is considerable evidence that the in-plane and out-of-plane modes interact with each other due to the multifaceted nature of seismic events. Therefore, the effects of interaction modes also have to be taken into account. The interaction effect of the out-of-plane behavior on the in-plane behavior of masonry infill in terms of resistance and deformation capacity is one of the behaviors that are very difficult to simulate and control in laboratory conditions because the laboratory conditions are different from each other [3]. But in-plane and out-of-plane interaction behaviors can be identified to some extent by modeling in finite element software. Some researchers consider the interaction effect of in-plane and out-of-plane significant, while others consider this effect negligible, and this difference in the opinion of researchers is a worrying issue. All studies showed that the detached parts of the masonry infill without contact with the frame are quite vulnerable to out-of-plane loading.

2- Numerical modeling

In this paper, the laboratory models of Mansouri et al. (2014) have been used for analytical models [4]. Analytical specimens, as shown in Fig. 1, consist of a single-bay single-story RC frame and an RC frame with solid masonry infill, with a scale of 1:2. The dimensions of the masonry infill are 2100×1300×106 and the dimensions of the brick are 31×49×106 (thickness×height×length) in millimeters.

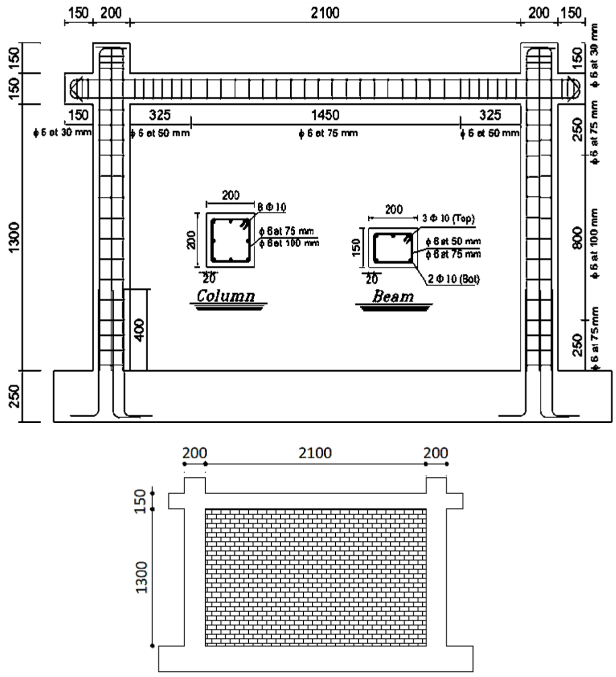


Fig. 1. Geometry and reinforcing details of reinforced concrete frame and infill-frame masonry (dimensions in millimeters) [32]

The masonry infill with four different connections with the surrounding frame according to Fig. 2 was investigated:

1. The frame is connected to the masonry infill on four sides (Fig. 2-a).
2. The frame is connected to the masonry infill on three sides, the upper infill is a brick away from the beam of the frame (Fig. 2-b).
3. The frame is connected to the middle frame of the building materials on both sides, and the side vertical lips of the infill are far a brick away from the surrounding frame (Fig. 2-c).
4. The frame is connected to the infill of the building materials on one side, and the side vertical lips and the

*Manuscript received December 2, 2022, Revised January 16, 2023, Accepted, March 3, 2023.

[1] Ph.D. Student, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran.

[2] Corresponding author. Assistant Professor, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran.

Email: jshafaei@shahroodut.ac.ir

upper lip of the infill are as far as a brick away from the surrounding frame (Fig. 2-d).

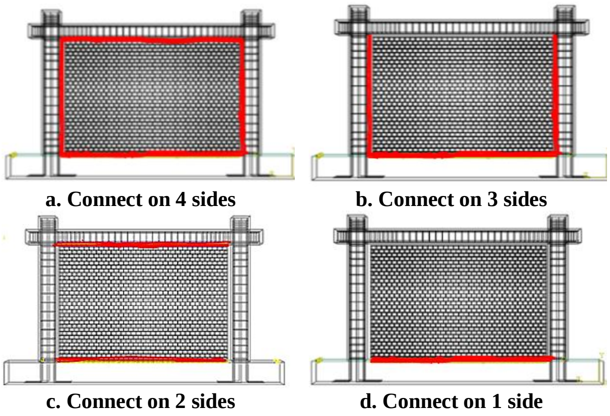


Fig. 2. Different connections of infill masonry with frame

3- Finite Element Analysis

The numerical models are generated in finite element ABAQUS soft. Static non-linear analysis (pushover) was performed for the models of the masonry-infilled frame with different boundary conditions. The results of the finite element study on the interaction of in-plane and out-of-plane masonry infills with different boundary conditions are described. The effect of interaction on the seismic response of masonry infill was analytically studied using nonlinear statistics, or a so-called pushover. The ultimate strength and effective stiffness of specimens can be estimated based on the developed bilinear force-displacement curves.

3-1 Out-of-plane loading

In this step, the out-of-plane pressure is applied on the entire surface of masonry infills equal to the ground acceleration from (1 g) to (10 g). The first specimen of the masonry infilled frame is connected to its surrounding frame on all four sides and has no distance from its surrounding frame. The acceleration level (10 g) predominantly provided the greatest displacement in the out-of-plane direction.

3-2 Out-of-plane loading after in-plane loading

Specimens were analyzed under in-plane loading and then under out-of-plane loading. During the in-plane step, the frame was applied and analyzed with the levels of drift of 0.5%, 1%, 2%, and 3%. During the out-of-plane step, the damaged model was analyzed under a monotonic out-of-plane pressure of 10 g. During the out-of-plane step, the RC frame was restrained for out-of-plane displacement.

3-3 In-plane loading after out-of-plane loading

Specimens were analyzed under out-of-plane loading and then under in-plane loading. During the out-of-plane step, the damaged model was analyzed under a monotonic out-of-plane pressure of 1 g. During the in-plane step, the frame was applied and analyzed with a level of drift of 6%. Analytical specimens then were loaded at different levels of ground accelerations in the out-of-plane direction and the amount of a reduction of strength and effectiveness was measured with in-plane loading capacity.

4- Conclusions

In this study, RC frames infilled with solid masonry blocks were examined using a nonlinear finite element approach to investigate the performance of four infill support configurations. The results of the investigations in this paper can be summarized as follows:

The masonry infill connected on four sides has higher stiffness and strength in out-of-plane loading than a masonry infill connected on three sides. The stiffness variations of masonry infill occur, at very high accelerations because at very low accelerations, the displacement of the infill does not occur in the out-of-plane direction. The masonry infill is connected from four sides in the relative displacement of 0.5%, 1%, 2%, and 3%. The more the relative displacement is the more the out-of-plane capacity drops. Therefore, the reduction of stiffness and strength is directly related to the damage in-plane.

In the masonry infill connected to the frame on three sides, when the relative displacement of the in-plane is 0.5%, the hardness drops more that the specimen where the relative displacement of the in-plane is 3%. The reason could be that the specimen with a relative in-plane displacement of 3% sticks to its surrounding frame with the arching action of the infill, and in this case, the stiffness increases. The loss of the connection between the infill and the frame leads to a greater loss in load-bearing and deformation capabilities. In the investigation of the in-plane behavior with the damage of the out-of-plane, the specimen with a one-way connection had the greatest decrease in stiffness, which was calculated to be about 40%.

مهندسی عمران فردوسی

https://civil-ferdowsi.um.ac.ir/

انجمن بتن ایران

انجمن مهندسی روسازی ایران

تأثیر شرایط مرزی بر عملکرد لرزه‌ای خارج از صفحه میان‌قاب مصالح بنایی با در نظر گرفتن اندرکنش رفتار داخل صفحه*

مقاله پژوهشی

دلارام استاد(۱) جلیل شفائی(۲)

DOI: 10.22067/JFCEI.2024.79409.1187

چکیده خسارت‌های مشاهده شده در طی زمین لرزه‌های گذشته، نشان می‌دهد آسیب‌دیدگی میان‌قاب‌ها در داخل صفحه و کاهش سطح تماس میان‌قاب و قاب پیرامونی منجر به افزایش آسیب‌پذیری در خارج از صفحه می‌شود. با توجه به شرایط متفاوت تماس میان‌قاب با قاب بتنی پیرامونی، اندرکنش و تأثیر رفتار خارج از صفحه بر روی رفتار داخل صفحه یکی از موضوعات جدید در زمینه بررسی عملکرد لرزه‌ای میان‌قاب‌های مصالح بنایی می‌باشد. در این مقاله، تأثیر شرایط مرزی مختلف میان‌قاب با قاب بتن مسلح که عبارتند از چهار لبه متکی به قاب، سه لبه متکی به قاب، دو لبه افقی متکی به قاب و یک لبه متکی به قاب، با تحلیل سه نوع بارگذاری که عبارتند از: ۱) بارگذاری خارج از صفحه تنها، ۲) بارگذاری خارج از صفحه بعد از بارگذاری داخل صفحه، ۳) بارگذاری داخل صفحه بعد از بارگذاری خارج از صفحه با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود ABAQUS ارزیابی شده است. نتایج نشان داد که عدم وجود اتصال مناسب بین ساختار قاب و میان‌قاب آسیب‌پذیری در جهت خارج از صفحه را افزایش می‌دهد و از فروپاشی آن‌ها جلوگیری نمی‌کند. آسیب قبلی ناشی از بارگذاری داخل صفحه که به حداکثر جابه‌جایی نسبی ۳٪ رسیده است، می‌تواند حدود ۷۰ درصد ظرفیت خارج از صفحه میان‌قاب را کاهش دهد؛ در نتیجه مقاومت و سختی تحت تأثیر شرایط مرزی و نوع بارگذاری قرار گرفته‌اند.

واژه‌های کلیدی میان‌قاب مصالح بنایی، اندرکنش داخل و خارج از صفحه، شرایط مرزی، تحلیل اجزای محدود.

The effect of Boundary Conditions on the Seismic Performance of Out-of-Plane Masonry Infills by Considering In-Plane Behavior Interaction

Delaram Ostad Jalil Shafaei

Abstract *The observed damage during the past earthquakes shows that the damage of the masonry infill in the in-plane and the reduction of the contact surface between the masonry infill and the surrounding frame led to an increase in the vulnerability out-of-plane. Considering the different contact conditions of the masonry infill with the surrounding concrete frame, the interaction, and influence of the out-of-plane on the in-plane behavior of the masonry infills, which is a new topic in the field of seismic performance of the masonry infills. In this paper, the effect of different boundary conditions the masonry infill and the reinforced concrete frame, which include four edges supported by the frame, three edges supported by the frame, two horizontal edges supported by the frame, and one edge supported by the frame, by analyzing three types of loading, which are: 1-out-of-plane loading only, 2-the out-of-plane loading after in-plane loading, 3-the in-plane loading after out-of-plane loading, have been evaluated by using the finite element software ABAQUS. The results demonstrated that the absence of proper connection between the frame structure and the infill increases the out-of-plane direction vulnerability, and does not prevent their collapse. Previous damage due to in-plane loading, which reached a maximum drift of 3%, can reduce about 70% of the out-of-plane capacity of the infill frame, and consequently, the strength and stiffness were affected by the boundary conditions and type loading.*

Key words Masonry infill, In-plane and out-of-plane interaction, Boundary condition, Finite element analysis.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۱/۸/۱۱ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۲/۱۲/۱۲ می‌باشد.

(۱) دانشجوی دکترای عمران-سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود.

(۲) نویسندهٔ مسئول، دانشیار عمران-سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود.

Email: jshafaei@shahroodut.ac.ir

مقدمه

دیوار یا میان‌قاب‌های مصالح بنایی سهمی در تحمل بارهای قائم ندارند. ظرفیت دیوارهای مصالح بنایی در دو حالت مجزای نیروی داخل صفحه و نیروی خارج از صفحه تعریف می‌شود. شواهد بسیار زیادی وجود دارد که حالت‌های داخل صفحه و خارج از صفحه با یکدیگر اندرکنش دارند و از این رو باید این تأثیر را به حساب آورد. در هنگام زلزله، میان‌قاب علاوه بر نیروهای داخل صفحه (نیروی افقی و نیروی قائم) تحت تأثیر نیروهای خارج از صفحه (نیروی عمود بر صفحه) نیز قرار می‌گیرد. این نیروهای خارج از صفحه می‌توانند نیروهای انتقالی از اعضای دیگر مانند دال بوده و یا نیروی اینرسی ناشی از شتاب خارج از صفحه خود دیوار باشند [1]. در بسیاری از زلزله‌ها یا حتی طوفان‌های شدید میان‌قاب‌های مصالح بنایی در جهت خارج از صفحه (عمود بر صفحه) دچار شکست می‌شوند (شکل ۱).

مقاومت خارج از صفحه میان‌قاب‌های مصالح بنایی عمدتا ناشی از عملکرد قوسی می‌باشد که تابعی از لاغری میان‌قاب، شرایط مرزی و مقاومت فشاری میان‌قاب است [2]. کنترل تأثیرات اندرکنش رفتار خارج از صفحه میان‌قاب مصالح بنایی بر رفتار داخل صفحه از جهت مقاومت و تغییر شکل در شرایط آزمایشگاهی بسیار مشکل است، زیرا شرایط آزمایشگاهی با یکدیگر متفاوت است [3]. رفتار اندرکنش داخل صفحه و خارج از صفحه با مدل‌سازی در نرم‌افزار اجزای محدود تا حدودی قابل شناسایی است. در چند سال اخیر پس از زلزله‌های متعددی که رخ داده است با خسارت‌های مشاهده شده از جمله خرابی سازه‌های مصالح بنایی، بررسی تأثیر اندرکنش داخل صفحه و خارج از صفحه بارهای لرزه‌ای امری مهم و حیاتی می‌باشد که مورد توجه محققان قرار گرفته است. مطالعات آزمایشگاهی بر روی رفتار خارج از صفحه را می‌توان در سه دسته متمایز خلاصه نمود: دسته اول شامل میان‌قاب‌های مصالح بنایی غیر مسلح در معرض فشار ناگهانی هوا و انفجار می‌باشد، دسته دوم شامل بارگذاری میان‌قاب با استفاده از محرک هیدرولیکی یا کیسه هوا و به ترتیب تحت اثر بار استاتیکی متمرکز و یا گسترده عمود بر سطح دیوار در قسمت مرکزی و یا در کل سطح نمونه می‌باشد، دسته سوم مربوط به کاربرد میز لرزان جهت وارد کردن شتاب زمین در جهت خارج از صفحه میان‌قاب می‌باشد.



اسپانیا، ۲۰۱۱



کرمانشاه، ۲۰۱۶



نپال، ۲۰۱۵

شکل ۱ مشاهده آسیب زلزله‌های گذشته در جهت خارج از صفحه

اولین مطالعاتی که در رفتار خارج از صفحه میان‌قاب‌های مصالح بنایی بررسی شد توسط داو و سی در سال ۱۹۸۹ بود. آن‌ها یک روش تحلیلی برای محاسبه ظرفیت باربری ترک‌خوردگی و نهایی خارج از صفحه میان‌قاب‌های محصور در قاب‌های فولادی برای دو نوع شرایط مرزی میان‌قاب با سه لبه متکی به قاب و یک لبه آزاد و میان‌قاب با هر چهار لبه متکی به قاب ارائه کردند. سپس، با مقایسه نتایج آزمایش‌ها و روش تحلیلی فوق، پیشنهاداتی را برای مقاصد طراحی بیان نمودند [4]. کاریدیس در سال ۱۹۹۲ اثر عدم تماس میان‌قاب به قاب در قسمت بالایی را قابل ملاحظه می‌دانستند [5]. بعد از آن آنجل و آبرامز در سال ۱۹۹۴ روشی را برای به دست آوردن ظرفیت بار جانبی یکنواخت میان‌قاب‌های مصالح بنایی غیر مسلح در دو حالت آسیب دیده و سالم ارائه نمودند، این محققان مشاهده کردند که ظرفیت خارج از صفحه قاب‌های میان‌پر مصالح بنایی به دلیل جابه‌جایی داخل از صفحه تا نصف ظرفیت خارج از صفحه

کاهش پیدا می‌کند؛ این کاهش ظرفیت خارج از صفحه به نسبت ظرفیت لاغری بستگی دارد [6]. نگرو و تایلور نیز در سال ۱۹۹۶ گزارش دادند اگر فاصله میان‌قاب به قاب در قسمت بالایی کمتر از ۱۰ میلی‌متر باشد اثر این فاصله بر ظرفیت خارج از صفحه میان‌قاب ناچیز است [7]. دافینس و همکاران در سال ۲۰۰۲ چهار حالت مختلف اتصال بین میان‌قاب و قاب را بررسی کردند، در حالتی که اتصال بین میان‌قاب و تیر بالایی وجود داشته باشد، مشاهده شد که پایداری میان‌قاب برای بارهای لرزه‌ای به دلیل پدیده عملکرد قوسی در خمش تأمین می‌شود. گاهی ممکن است اتصال بالایی به صورت غیر استاندارد اجرا شود، مثلا اتصال نیمه‌پر باشد و یا فاصله کوچکی حدود سه میلی‌متر وجود داشته باشد. در حالتی که بارهای لرزه‌ای قائم پس از بارهای افقی اعمال می‌شود، اندازه فاصله کوچک بین ملات و تیر بالایی بسیار حائز اهمیت می‌باشد، چرا که به دلیل این فاصله جابه‌جایی نسبی بزرگی بین تکیه‌گاه پایینی و بالای میان‌قاب ایجاد می‌شود. بنابراین مسئله پایداری میان‌قاب‌های مصالح بنایی آزمایش شده، مسئله مربوط به مقاومت نیست؛ بلکه بیشتر مربوط به حرکت‌شناسی، مثلا جابه‌جایی آجرها می‌باشد [8]. آندو و همکاران در سال ۲۰۰۶ گزارش نمودند که عدم اتصال کامل میان‌قاب به تیر بالایی قاب در قاب فولادی باعث کاهش سختی اولیه می‌شود، اما بر روی ظرفیت نهایی تأثیری ندارد. کاهش سختی اولیه قاب میان‌پر مصالح بنایی به علت عدم تماس کامل قاب به میان‌قاب در مراحل اولیه بارگذاری و در نتیجه کاهش سهم باربری میان‌قاب می‌شود، همچنین پیشنهاد داده شد با تعبیه یک ورق باربر در گوشه‌ها می‌توان این مشکل را حل نمود [9]. تسنیمی و زمردی در سال ۲۰۱۰ با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود دایانا به بررسی اندرکنش نیروهای داخل صفحه و خارج از صفحه در میان‌قاب‌های مصالح بنایی در قاب بتن مسلح پرداختند. مشاهده کردند اندرکنش قابل توجهی بین نیروهای خارج از صفحه و داخل صفحه وجود دارد به طوری که با افزایش نیروهای خارج از صفحه، ظرفیت داخل صفحه میان‌قاب کاهش می‌یابد. در نظر گرفتن شرایط مرزی قاب با میان‌قاب‌های مصالح بنایی که از دو طرف اتصال دارد هم‌خوانی بهتری با مقادیر روابط تجربی مقاومت خارج از صفحه میان‌قاب مصالح بنایی ارائه شده توسط محققان دارد [10]. کمارانی و همکاران در سال ۲۰۱۱ به بررسی تأثیر اندرکنش داخل صفحه و خارج از صفحه میان‌قاب‌های مصالح بنایی پرداختند. برای آزمایش میان‌قاب‌های مورد مطالعه سه نوع مختلف از پروتکل بارگذاری آزمایش را ارائه دادند: ۱) بارگذاری خارج از صفحه میان‌قاب بعد از بارگذاری داخل صفحه میان‌قاب، ۲) بارگذاری داخل صفحه میان‌قاب بعد از بارگذاری خارج از صفحه میان‌قاب و ۳) ترکیب بارگذاری هم‌زمان خارج از صفحه و داخل صفحه میان‌قاب. نتایج آزمایشگاهی بارگذاری در داخل صفحه میان‌قاب بعد از بارگذاری شدید در خارج از صفحه میان‌قاب نشان می‌دهد که سختی داخل صفحه افت می‌کند، اما مقاومت داخل صفحه میان‌قاب افت چندانی را تجربه نمی‌کند. اگر هم زمان نمونه‌ها در داخل صفحه و در خارج از صفحه بارگذاری شوند، میان‌قاب رفتار پایداری با ظرفیت خارج از صفحه کافی را از خود نشان می‌دهد [11]. دولت‌شاهی در سال ۲۰۱۲ با در نظر گرفتن مطالعات اندکی که در رابطه با اندرکنش دیوارهای مصالح بنایی در داخل صفحه و خارج از صفحه وجود دارد، چهارچوبی برای حل این عدم قطعیت‌ها با انجام آزمایش‌های تجربی، عددی و تحلیلی مطرح کرد. این آزمایش‌ها شامل بارگذاری چرخه‌ای استاتیکی داخل صفحه و خارج از صفحه تحت شرایط مرزی مختلف بود. وی اظهار داشت، بارگذاری خارج از صفحه تحت کنترل- جابه‌جایی از ظرفیت داخل صفحه کم نمی‌کند، اما در بارگذاری خارج از صفحه تحت نیرو- کنترل از ظرفیت داخل از صفحه کاسته می‌شود [12].

بررسی پیشینه تحقیقات و بررسی پژوهش‌های آزمایشگاهی، عددی و تحلیلی دیگر محققان از جمله لیو و همکاران در سال (۲۰۱۱) و رابینوییچ و مداح در سال (۲۰۱۱) محققانی دیگری از جمله پریرا و همکاران در سال (۲۰۱۱) و هاک و همکاران در سال (۲۰۱۴) و آخوندی و همکاران در سال (۲۰۱۵ و ۲۰۱۶ و ۲۰۲۰)، فورتادو و همکاران [13] در سال (۲۰۱۵) و میسیر و همکاران در سال (۲۰۱۶)، وانگ در سال (۲۰۱۷)، آنیک در سال (۲۰۲۰)، دی دومینیکو و همکاران در سال (۲۰۲۱) مشاهده شد که این مطالعات با شرایط مرزی مختلف و تغییر پارامترهای گوناگونی از مشخصات قاب و میان‌قاب صورت پذیرفته است تا روش‌هایی برای آنالیز و تحلیل قاب‌های دارای میان‌قاب مصالح بنایی به دست آوردند که با زلزله واقعی مطابقت داشته باشد [14-24]؛ اما تا به امروز هنوز به نتیجه واحدی نرسیده‌اند. برخی از محققان اثر اندرکنش داخل صفحه و خارج از صفحه را قابل ملاحظه و برخی دیگر این اثر را قابل صرف نظر شدن می‌دانند؛

این تفاوت نظر محققان موضوع نگران کننده است که آیا این تناقض را می‌توان در پاره‌ای از موارد به مشخصات قاب آزمایشگاهی مرجع، در کارهای آزمایشگاهی آن‌ها اختصاص داد [2]. هدف از مقاله حاضر بررسی و ارزیابی آسیب‌پذیری میان‌قاب مصالح بنایی در زلزله و تأثیر شرایط مرزی مختلف در عملکرد رفتار خارج از صفحه میان‌قاب‌های مصالح بنایی پرداخته شده است. شرایط مرزی عبارتند از چهار لبه متکی به قاب، سه لبه متکی به قاب و لبه بالای میان‌قاب آزاد است، دو لبه افقی متکی به قاب و دو لبه قائم آزاد و یک لبه پایین میان‌قاب متکی به قاب؛ که تحت سه نوع بارگذاری: ۱) بارگذاری میان‌قاب مصالح بنایی در جهت خارج از صفحه تحت شتاب‌های مختلف. ۲) بارگذاری خارج از صفحه بعد از بارگذاری داخل از صفحه درجابه‌جایی‌های نسبی ۰/۵٪، ۱٪، ۲٪ و ۳٪ و بررسی آسیب‌های خارج از صفحه. ۳) بارگذاری داخل صفحه تا ۶٪ جابه‌جایی نسبی پس از بارگذاری خارج از صفحه و بررسی آسیب داخل صفحه در نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس مورد بررسی قرار گرفت.

مدل‌های پیش بینی ظرفیت خارج از صفحه میان‌قاب‌های مصالح بنایی

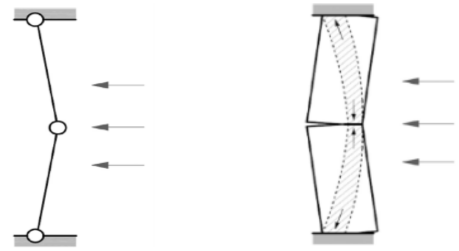
ظرفیت پیش‌بینی خارج از صفحه میان‌قاب‌های م صالح بنایی بر ا ساس دو مدل پیش‌بینی می شود: ۱) مدل‌های مبتنی بر عملکرد خمشـــی میان‌قاب در خارج از صـــفحه. ۲) مدل‌های مبتنی بر عملکرد قوسی میان‌قاب در خارج از صفحه.

مدل‌های مبتنی بر عملکرد خمشی میان‌قاب در خارج از صفحه

در مدل‌های مبتنی بر عملکرد خمشی، ظرفیت خارج از صفحه میان‌قاب به وسیله حداکثر فشار جانبی یکنواخت عمود بر صفحه، که باعث فروپاشی میان‌قاب می‌گردد، محاسبه می‌شود. اکثر فرمول‌های تحلیلی که در ادبیات فنی برای این مدل مطرح شده است، بر اساس عملکرد خمشی است که ظرفیت خارج از صفحه میان‌قاب را تعیین می‌کنند. نظریه تیموشینکو برای تعیین حداکثر فشار جانبی عمود بر صفحه میان‌قاب، اولین روشی بود که ارائه شد [25]. اما پس از آن با توجه به اینکه رفتار واقعی میان‌قاب، حتی در مراحل اولیه بارگذاری خارج از صفحه میان‌قاب یک رفتار غیرخطی شدید می‌باشد. محققان دیگری از جمله هسلتاین و هندری [26-28] روش‌های دیگری را بر مبنای تئوری خطوط گسیختگی و عملکرد قوسی دو جهته مشابه دال‌های دوطرفه پیشنهاد دادند، که از میان این محققان، هسلتاین [28] روشی را پیشنهاد داد که حداکثر بار خارج از صفحه میان‌قاب را، بر مبنای مقاومت خمشی عمود بر درز ملات محاسبه می‌کند. هندری و همکاران [26,27] برای ارزیابی مقاومت خمشی خارج از صفحه میان‌قاب یک واحد طول یا یک نوار یک متری از صفحه میان‌قاب را در نظر گرفتند و مقاومت خارج از صفحه به صورت فشاری به صفحه اعمال می‌شود. محدودیت‌های واقعی که در سه مدل اشاره شده فوق وجود، این مسئله است که در هر سه مدل، برای محاسبه ظرفیت خارج از صفحه میان‌قاب، صرفا رفتار خمشی است که رفتار میان‌قاب را کنترل می‌کند. با این‌حال، نتایج آزمایشگاهی نشان داده است که مکانیزم مقاومتی غالب در خارج از صفحه میان‌قاب، ناشی از عملکرد قوسی میان‌قاب می‌باشد. در واقع مکانیزم عملکرد قوسی یک مسیر جدید انتقال بار را برای باربری در خارج از صفحه میان‌قاب، بین قاب و میان‌قاب ترک خورده، تعیین می‌کند.

مدل‌های مبتنی بر عملکرد قوسی میان‌قاب در خارج از صفحه

مشاهدات آزمایشگاهی و تحلیلی محققان گذشته نشان می‌دهد، که عملکرد قوسی میان‌قاب بعد از ترک‌خوردگی میان‌قاب در خارج از صفحه می‌تواند یک مسیر نیروی جایگزین برای تحمل تقاضاهای نیرویی و جابه‌جایی خارج از صفحه میان‌قاب باشد. به این ترتیب که بعد از ظهور اولین ترک در میانه ارتفاع میان‌قاب، میان‌قاب به صورت یک جسم صلب حول انتهای تکیه‌گاهی خود دوران کرده و نیروهای خارج از صفحه میان‌قاب توسط یک میدان فشاری همان طور که در شکل (۲-الف) نشان داده است، به تکیه‌گاه‌های خود که در واقع قاب‌ها هستند، منتقل می‌شود. عملکرد قوسی میان‌قاب در خارج از صفحه را می‌توان توسط مدل محاسباتی و ایده‌آل شده به صورت یک قوس سه مفصله همان‌طور که در شکل (۲-ب) نشان داده شده است، بیان کرد. بر اساس مدل عملکرد قوسی میان‌قاب، گسیختگی در خارج از صفحه بر اساس یکی از دو حالت خردشدگی مصالح بنایی و ایجاد فاصله بین قاب و میان‌قاب، اتفاق می‌افتد.



(الف) عملکرد قوسی میان‌قاب در خارج از صفحه

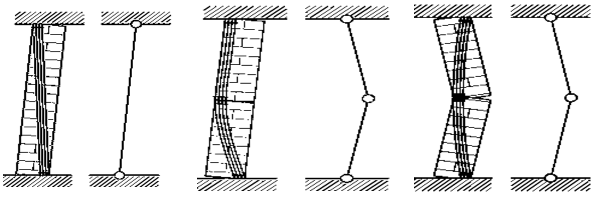
(ب) شمایی از سه نقطه ایده‌آل برای عملکرد قوسی

شکل ۲ مکانیسم عملکرد قوسی میان‌قاب در خارج از صفحه [2]

تأثیر شرایط مرزی بر روی عملکرد قوسی

اولین بار در مدل‌های آزمایشگاهی مک داول و همکاران در سال ۱۹۵۶ مشاهده گردید که بر خلاف شکست ناشی از شکل‌پذیری، شکست به صورت عملکرد قوسی یا فشاری بر روی دیوارهای غیر مسلح مصالح بنایی رخ می‌دهد. مک داول با شروع به تحقیق در مورد عملکرد قوسی فرض کرد که چرا دیوارهای مصالح بنایی نیرویی شش برابر نیرویی که توسط دال حمایت می‌شود را به دست می‌آورند. وی استدلال کرد که این امر به دلیل نیروهای فشاری اضافی است که از طریق عملکرد قوسی ایجاد می‌شود. این فرضیه تأیید شد و امروزه یک نظریه جهانی به عنوان تئوری عملکرد قوسی نامیده می‌شود [29].

برای عملکرد قوسی سه شرایط مرزی به صورت کلی در نظر گرفته می‌شود: ۱) میان‌قاب در چهار طرف به قاب متصل است (عملکرد قوسی دو جهته)، (شکل ۳–الف)، ۲) میان‌قاب در سه جهت به قاب متصل است (عملکرد قوسی یک جهته)، (شکل ۳–ب، پ) و ۳) میان‌قاب در بالا و پایین به قاب متصل است (عملکرد قوسی یک جهته)، (شکل ۳–ب، پ). به صورت کلی اگر میان‌قاب در هر چهار جهت اتصال داشته باشد، عملکرد قوسی (دو جهت افقی و دو جهت قائم) اتفاق می‌افتد. اگر میان‌قاب از سه جهت اتصال داشته باشد (از سمت تیر بالای قاب اتصال ندارد)، عملکرد در یک جهت اتفاق می‌افتد و قابلیت تحمل بار و تغییر شکل کاهش می‌یابد. عملکرد قوسی یک طرفه شامل قوس افقی و یا عمودی است که یک قوس سه مفصله است و عملکرد قوسی با سه مفصل کمترین مقاومت خارج از صفحه را در مقایسه با میان‌قاب‌هایی که از چهار جهت اتصال دارند، از خود نشان می‌دهند.



(الف) چهار طرف اتصال (عملکرد قوسی سه مفصله)

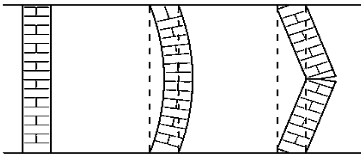
(ب) دو طرف اتصال افقی (عملکرد قوسی سه مفصله)

(پ) دو طرف اتصال افقی (عملکرد قوسی دو مفصله)

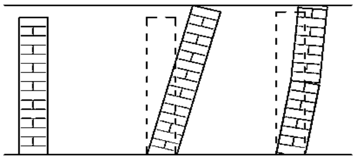
شکل ۳ عملکرد قوسی تحت شرایط مرزی مختلف [30]

شکست خارج از صفحه قاب میان‌پر مصالح بنایی ناشی از عملکرد قوسی

شکست خارج از صفحه میان‌قاب‌های مصالح بنایی به عنوان یک شکست غیر سازه‌ای باعث آسیب جانی ساکنان می‌شود. طوری که ابتدا مرکز میان‌قاب خرد شده و سپس به سمت بیرون پرتاب می‌شود، این مد شکست در میان‌قاب‌هایی با نسبت ابعادی زیاد و ضخامت کم (لاغر) رخ می‌دهد و در میان‌قاب‌هایی با ابعاد معمولی انتظار رخ دادن نمی‌رود [30]. علاوه بر آن شکست خارج از صفحه قاب میان‌پر در طبقات بالایی ساختمان‌های بلند اتفاق می‌افتد که شتاب کف طبقه در اثر حرکت زمین زیاد است. در طبقات پایین‌تر شتاب کف طبقه با برش‌های زیاد طبقه ترکیب می‌شود، میان‌قاب در هر چرخه بارگذاری تمایل به خارج شدن از داخل قاب پیرامونی را دارند که این نوع شکست بستگی به شرایط مرزی اتصال میان‌قاب به قاب پیرامونی خود و عملکرد قوسی نیز دارد به طوری که اگر میان‌قاب مصالح بنایی از هر چهار طرف به قاب پیرامونی متکی باشد و شکست با بیرون آمدن خارج از صفحه میان‌قاب از وسط آن اتفاق می‌افتد (شکل ۴–الف و ۵–الف). در میان‌قاب‌هایی که در سه طرف به قاب متکی باشد و به تیر فوقانی متصل نشده‌اند، شکست میان‌قاب با جدا شدن و بیرون آمدن میان‌قاب از قسمت فوقانی اتفاق می‌افتد (شکل ۴–ب و ۵–ب). در حالتی که میان‌قاب مصالح بنایی از دو طرف به قاب پیرامونی متکی و لبه‌های قائم آزاد باشد و شکست میان‌قاب به صورت افقی در جهت خارج از صفحه میان‌قاب از وسط آن اتفاق می‌افتد (شکل ۵–پ).

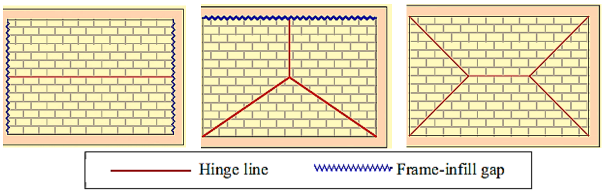


(الف) ترک میانه در وسط میان‌قاب



(ب) شکست در اثر عدم انسجام دیوار به بالای قاب

شکل ۴ حالت‌های مختلف شکست میان‌قاب در خارج از صفحه [23]



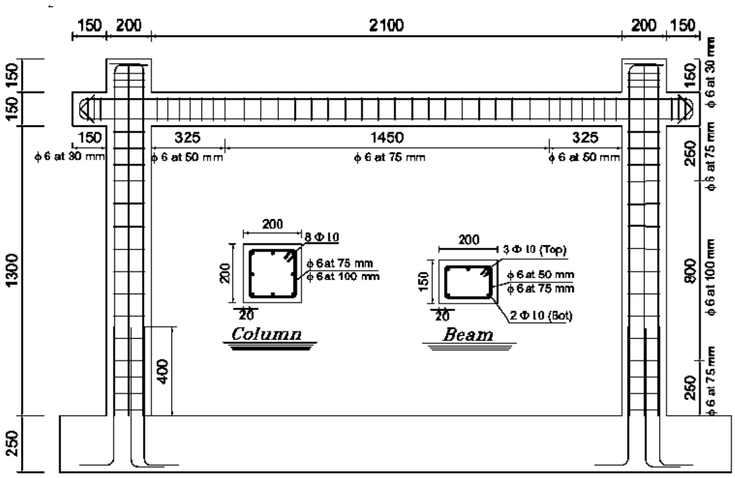
(الف) چهار طرف اتصال به قاب (ب) سه طرف اتصال به قاب (پ) دو طرف اتصال به قاب

شکل ۵ عملکرد قوسی میان‌قاب مصالح بنایی در شرایط مرزی مختلف [23]

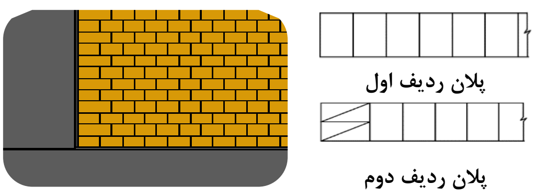
مدل‌سازی عددی

مشخصات هندسی مدل‌ها

در این مقاله برای بررسی اندرکنش خارج صفحه و داخل صفحه قاب میان‌پر مصالح بنایی تحت شرایط مرزی مختلف از مدل آزمایشگاهی قاب با میان‌قاب مصالح بنایی آزمایشگاهی منصوری و همکاران برای مدل عددی استفاده شده است [31]. این مدل مرجع یک قاب بتنی یک طبقه-یک دهانه و یک قاب میان‌پر مصالح بنایی با مقیاس ۱:۲ تحت بار جانبی داخل صفحه است. شکل (۶) مشخصات اجرایی قاب بتن مسلح غیر لرزه‌ای را نشان می‌دهد. ابعاد میان‌قاب که در داخل قاب بتنی قرار گرفته برابر با ۱۰۶×۱۳۰۰×۲۱۰۰ و ابعاد آجر ۳۱ × ۴۹ × ۱۰۶ به ترتیب (ضخامت × ارتفاع × طول) بر حسب میلی‌متر است. الگوی آجرچینی میان‌قاب‌های مصالح بنایی در شکل (۷) نشان داده شده است. مشخصات مصالح میان قاب مصالح بنایی در جدول (۱) نشان داده شده است.



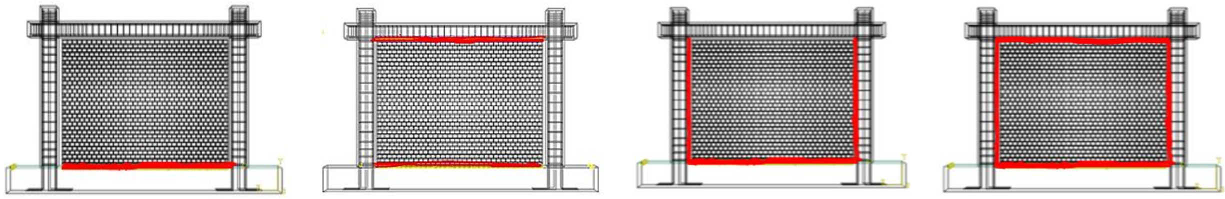
شکل ۶ ابعاد و جزئیات اجرایی قاب بتن مسلح (اندازه بر حسب میلی‌متر) [31]



شکل ۷ الگوی آجر چینی قاب با میان‌قاب مصالح بنایی

جدول ۱ مشخصات نمونه‌های آزمایشگاهی [31]

مصالح	مشخصات	مقدار (MPa)
بتن	مقاومت فشاری	۲۱/۹
آجر	مقاومت فشاری	۹/۱۶
ملات ماسه سیمان	مقاومت فشاری	۸/۳۳
میلگردهای طولی	مقاومت تسلیم	۴۳۸/۳
	مقاومت نهایی	۶۴۵
میلگردهای عرضی	مقاومت تسلیم	۳۹۶/۳
	مقاومت نهایی	۵۰۹/۳



(الف) چهار طرف اتصال (ب) سه طرف اتصال (پ) دو طرف اتصال (ت) یک طرف اتصال

شکل ۸ شمای اتصال مختلف میان‌قاب به قاب بتن مسلح

در این مقاله چهار شـرایط مرزی مختلف مطابق شـکل (۸) در بارگذاری خارج از صفحه بررسی گردید:

۱. قاب به میان‌قاب در چهار طرف اتصال دارد (شکل ۸–الف).

۲. قاب به میان‌قاب در سه طرف اتصال دارد، لبه‌های بالایی میان‌قاب به اندازه یک آجر با قاب پیرامونی خود فاصله دارد (شکل ۸–ب).

۳. قاب به میان‌قاب در دو طرف اتصال دارد، لبه‌های قائم کناری میان‌قاب به اندازه یک آجر با قاب پیرامونی خود فاصله دارد (شکل ۸–پ).

۴. قاب به میان قاب در یک طرف اتصـــال دارد، لبه های قائم کناری و لبه بالایی میان قاب به اندازه یک آجر با قاب پیرامونی خود فاصله دارد (شکل ۸–ت).

شرایط بارگذاری

مدل‌های عددی میان‌قاب‌های مصالح بنایی با بازشو در سه سطح بارگذاری با تحلیل غیرخطی بررسی می‌شوند:

۱. بارگذاری خارج از صفحه تحت شتاب‌های مختلف.

۲. بارگذاری خارج از صفحه پس از بارگذاری داخل صفحه در جابه‌جایی‌های نسبی ۰/۵٪، ۱٪، ۲٪ و ۳٪.

۳. بارگذاری داخل‌صفحه تا ۶٪ جابه‌جایی نسبی پس از بارگذاری خارج از صفحه (1g).

مقدار نیروی خارج از صـــفحه به عنوان وزن واحد ســـطح دیوار در سطح شتاب‌های مختلف در جدول (۲) نشان داده شده است.

جدول ۲ مقدار بار خارج از صفحه در سطح شتاب‌های مختلف

مقدار بار خارج از صفحه بر سطح (N/mm²)	بارگذاری در سطح شتاب‌های مختلف
۰/۰۰۲	۱g
۰/۰۰۴	۲g
۰/۰۰۸	۴g
۰/۰۱۲	۶g
۰/۰۱۶	۸g
۰/۰۲	۱۰g

مدل اجزای محدود

هندسه و مش‌بندی

نرم‌افزار تحلیل اجزای محدود آباکوس دارای چندین نوع المان است که برای هر مدل باید عنصر مناسب انتخاب شود تا از نتایج

اطمینان حاصل شود. در این مقاله از المان‌های کاهش یافته سه‌بعدی هشت گره با نقطه ادغام گاوسی در المان‌ها (C3D8R) برای شبیه‌سازی قاب‌های بتن مسلح و از آجر و المان جامد (TRUSS T3D2) برای شبیه‌سازی طولی و عرضی استفاده شده است [32]. تجزیه و تحلیل حساسیت مش برای اطمینان از مناسب بودن نوع و اندازه مش انتخاب شده، انجام شد.

رویکرد مدل‌سازی

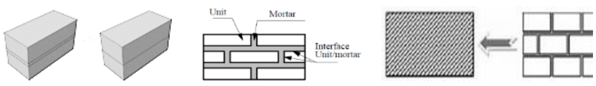
مدل‌سازی عددی مواد شکننده مانند بتن و مصالح بنایی در چند دهه گذ شته عمدتا در سه گروه میکرو، ماکرو و مزو طبقه‌بندی می‌شوند، شکل (۹).

ماکرو. رویکردهای مقیاس ماکرو برای سازه‌های بزرگ و به‌ویژه برای تحلیل لرزه‌ای ترجیح داده می‌شوند. تجزیه و تحلیل مقیاس ماکرو با بسیاری از مفروضات ساده شده برای کاهش قابل توجه زمان محاسباتی همراه است [33].

میکرو. در رویکرد مدل سازی در مقیاس میکرو، هر قسمت از میان‌قاب‌های مصالح بنایی با استفاده از روش اجزای محدود به طور دقیق مدل‌سازی می‌شود. مدل‌سازی در مقیاس میکرو بالاترین سطح دقت را دارد و عمدتا پاسخ دقیق سازه در کنار مسیر دقیق ترک‌ها نقطه مورد توجه است. با این حال، زمان ایجاد یک مدل عددی کامل و تجزیه و تحلیل تقاضای محاسباتی بسیار قابل توجه است. مشکل اصلی در تجزیه و تحلیل در مقیاس میکرو، زمان محاسباتی زیاد برای ساخت مدل عددی و اجرای آنالیز است [34].

مزو. در مدل‌سازی اجزای محدود در مقیاس مزو، آجر و ملات به طور مشخص توسط دو نوع عنصر تعریف می‌شوند. برای هر دو نوع عنصر، رفتار خطی و غیرخطی به طور جداگانه تعریف شده است تا به سطح دقت بهتری دست یابد. آجرها به نصف ضخامت ملات منبسط می‌شوند و برهمکنش بلوک‌های منبسط شده مختلف توسط مدل تماس چسب سطحی شبیه‌سازی شده است. ملات مدل‌سازی نمی‌شود و تنها خصوصیات مکانیکی آن در نرم‌افزار تعریف می‌شود. در مقیاس مزو مسیر دقیق ترک مهم نیست، بلکه رفتار کلی سازه مهم است [35].

از نظر سطح دقت و تقاضای محاسباتی، مدل‌سازی در مقیاس مزو جایی بین تحلیل مقیاس میکرو و ماکرو است. در بین رویکردهای میکرو و ماکرو، رویکرد مدل‌سازی میکرو با جزئیات بیشتری همراه است که در آن اندرکنش بین واحدهای بنایی و اتصالات به صراحت با استفاده از عناصر رابط در نظر گرفته می‌شود. روش‌های تحلیل مبتنی بر رویکردهای مزو و مقیاس ماکرو معمولا با برخی فرضیات ساده‌سازی برای بهبود کارایی محاسباتی همراه هستند و واضح است که دقت تحلیل کمتر از تحلیل میکرو است. بنابراین، برای سازه‌های بزرگ، استفاده از تجزیه و تحلیل در مقیاس مزو و ماکرو منطقی‌تر و راحت‌تر است. با توجه به زمان محاسباتی زیاد مرتبط با تجزیه و تحلیل در مقیاس میکرو و مزو، تجزیه و تحلیل مقیاس ماکرو برای سازه‌های بزرگ و به ویژه برای تجزیه و تحلیل لرزه‌ای ترجیح داده می‌شود. در این مقاله از مدل‌سازی در مقیاس مزو استفاده شده است.



(الف) رویکرد ماکرو [33] | (ب) رویکرد میکرو [34] | (پ) رویکرد مزو [35]

شکل ۹ رویکرد مدل‌سازی میان‌قاب مصالح بنایی

رفتار چسبنده مبتنی بر سطح

برای بررسی شکست مواد مختلف از مدل چسبنده به طور گسترده استفاده شده است. این مفهوم را می‌توان برای مواردی استفاده کرد که مقاومت رابط و کل سازه در نظر گرفته شود. المان‌های چسبنده اغلب بین دو سطح قرار می‌گیرند و در صورت وجود جابه‌جایی نسبی باعث ایجاد تنش در سطوح می‌شوند. سه مدل رفتاری مختلف شامل تنش تک محوری، پیوسته و کشش-جداشدگی را می‌توان برای المان‌های چسبنده تعریف کرد. به طور کلی تأثیر رفتار مواد چسبنده بر رفتار سازه بیشتر تحت تأثیر رفتار مصالح اطراف می‌باشد [36,37]. مدل رفتار چسبنده مبتنی بر سطح از سه بخش تشکیل شده است: رفتار جداسازی کشش الاستیک خطی، معیار شروع آسیب و معیار تکامل آسیب که به ترتیب در روابط (۱، ۲ و ۳) تعریف شده‌اند [38]:

$$t = \begin{Bmatrix} t_n \\ t_s \\ t_t \end{Bmatrix} \begin{bmatrix} k_{nn} & k_{ns} & k_{nt} \\ k_{ns} & k_{ss} & k_{st} \\ k_{nt} & k_{st} & k_{tt} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_n \\ \delta_s \\ \delta_t \end{Bmatrix} = KS \quad (۱)$$

$$\left\{\frac{(t_n)}{t_n^0}\right\}^2 + \left\{\frac{(t_s)}{t_s^0}\right\}^2 + \left\{\frac{(t_t)}{t_t^0}\right\}^2 = 1 \quad (۲)$$

$$t_n = \begin{cases} (1-D)\bar{t_n} & \bar{t_n} \geq 0 \\ \bar{t_n} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$t_s = (1-D)\bar{t_s} \qquad t_t = (1-D)\bar{t_t} \quad (۳)$$

t_n، t_s، t_t به ترتیب تنش نرمال و تنش‌های برشی به وجود آمده روی سطح بر اثر جابه‌جایی نسبی هستند. تغییر مکان‌های نسبی دو سطح به ترتیب در جهت عمود و دو جهت موازی را با s_n، s_s، s_t نشان داده می‌شوند. بالانویس، t^0، در رابطه (۲) مقادیر اوج را نشان می‌دهد. در رابطه بالا منظور از ماتریس k، ماتریس سختی المان رابط است. در اینجا $\bar{t_n}$، $\bar{t_s}$، $\bar{t_t}$ اجزای تنش تماسی هستند که توسط رفتار جداسازی کششی الاستیک برای جداسازی‌های جاری بدون آسیب پیش‌بینی می‌شوند. مقادیر عددی سختی در راستای برشی و نرمال با رابطه (۴) محاسبه می‌شود [38,39]:

$$K_{nn} = \frac{E_u E_m}{h_m(E_U - E_m)}$$

$$K_{ss} = K_{tt} = \frac{G_u G_m}{h_m(G_U - G_m)} \quad (۴)$$

در رفتار تنش- جداشدگی موضوع مهمی که باید بررسی شود نحوه رفتار سطوح پی از بین رفتن چسبندگی آن‌ها است. این رفتار به صورت رفتار فشاری و اصطکاک مدل‌سازی می‌گردد، پس ضریب اصطکاک به عنوان تابعی از رفتار فشاری در نظر گرفته می‌شود. هنگامی که سطوح در تماس با یکدیگر نیستند، فشاری بین آن‌ها منتقل نمی‌شود، ولی هنگامی که دو سطح با یکدیگر در تماس هستند، نیروی فشاری می‌تواند بین آن‌ها منتقل گردد. رفتار سطوح در راستای عمودی، به صورت مدل تماس سخت در نظر گرفته می‌شود. یعنی هنگامی که چسبندگی سطوح یا یا به اصطلاح ملات بین واحد بنایی از بین می‌رود، این دو سطح هیچ نفوذی بر یکدیگر نداشته و رفتار سخت خواهند داشت. همچنین در راستای برشی فرض می‌شود که تا قبل از شروع کاهش سختی چسبندگی، فقط مدل رفتاری چسبنده فعال بوده و مدل اصطکاک غیر فعال است. هنگامی که کاهش سختی چسبندگی شروع می‌شود، مدل اصطکاک فعال شده و سهمی از تنش برشی را بر عهده می‌گیرد. فعل و انفعالات بین آجرهای بنایی بین سطوح تماس با تنظیم رفتار نرمال و مماسی تعریف می‌شود.

مشخصات اولیه مصالح بتنی و آجری از جمله مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته، چگالی و ضریب پواسون بر اساس مقاله منصوری و همکاران انتخاب گردیده است [31]. به منظور صحت‌سنجی بین نتایج تحلیلی و نتایج آزمایشگاهی و انطباق منحنی‌های بار- تغییرمکان نمونه‌های تحلیلی و آزمایشگاهی برای تعریف رفتار بتن آسیب دیده پلاستیک در نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس پارامترهای نظیر زاویه اتساع، خروج از مرکزیت، انرژی شکست در کشش و برش، سختی ملات در زاویه اتساع مقدار بلند شدگی در اثر تغییر شکل برشی را مشخص می‌کند [40]. خروج از مرکزیت، تابع پتانسیل جریان در ابتدا محور افقی تنش هیدرواستاتیک را با زاویهٔ ۹۰ درجه قطع می‌کند که تحت این شرایط، این تابع در واقع یک منحنی خواهد بود. σ_{bo}/σ_{co} نسبت تنش فشاری حداکثر دو محوره به تک محوره است، مقدار این پارامتر بین ۱ تا ۱/۲۷ متغیر است [41]. پارامتر k در واقع شکل مقطع عرضی سطوح بارگذاری را تعیین می‌کند، مقدار این پارامتر بین ۰/۵ تا ۱ است. اگر مقدار این پارامتر برابر با یک در نظر گرفته شود، شکل مقطع عرضی سطح تسلیم شبیه دراکر- پراگر می‌گردد [42]. پارامتر ویسکوزیته، در تحلیل اجزای محدود بر اساس تئوری بتن آسیب دیده پلاستیک دارای پتانسیل بسیار زیادی برای واگرایی زودرس است، زاویه اتساع در بتن آسیب دیده پلاستیک مقدار آن بسیار ناچیز است و در سربارهای قابل توجه مقدار آن در حد صفر است. البته این پارامتر از آزمایش مستقیم و استاندارد حاصل نمی‌شود، برای مصالح بنایی مقدار آن ۵ تا ۲۰ در نظر گرفته می‌شود. در واقع پارامتر زاویه اتساع (انبساط برشی)، مقدار بلندشدگی در اثر جابه‌جایی برشی را مشخص می‌کند، این پدیده اثر زبری سطح است که به این صورت نمایان

می‌شود. بایستی توجه شود که مقدار انبساط برشی بستگی به مقدار تنش فشاری محصورشدگی دارد و با افزایش این تنش فشاری، زاویه اتساع کم می‌شود. همچنین، با شروع لغزش و تحت تنش‌های فشاری زیاد، به علت از بین رفتن ناهمواری‌های سطحی و صاف شدن سطوح قبل از لغزش، زاویه اتساع به سمت صفر میل می‌کند [12,43]. جداول (۳) و (۴) خواص مکانیکی آجرهای بنایی و پارامترهای رابط برشی مورد استفاده در مطالعات پارامتری در کار فعلی را نشان می‌دهد.

روش‌های تحلیل

با توجه به روش‌های عددی، تجزیه و تحلیل مقیاس مزو را می‌توان به طور عمده به تحلیل دینامیکی ضمنی و صریح طبقه‌بندی کرد. در روش ضمنی، در هر مرحله زمانی تکرار برای حل یک سیستم معادلات مورد نیاز است. در تجزیه و تحلیل که دامنه جابه‌جایی بزرگ در نظر گرفته شود از نظر محاسباتی و زمانی گسترده می‌شود. روش ضمنی نیاز به تکرار برای دستیابی به تحمل همگرایی مطلوب دارد. بر خلاف روش ضمنی، روش صریح نیازی به تکرار و تشکیل ماتریس سختی مماس ندارد. اما راه حل‌های صریح معایبی نیز دارند. به عنوان مثال، از آنجایی که به تعادل نمی‌رسد، خطر همگرایی به جواب‌های اشتباه وجود دارد. علاوه بر این، نتیجه نهایی می‌تواند به گام زمانی انتخاب شده بستگی داشته باشد و همچنین به دامنه‌های کوچک‌تری نیاز دارد که تجزیه و تحلیل زمان بیشتری می‌گیرد.

حل دینامیکی صریح

در این مقاله از روش حل دینامیکی صریح استفاده شده که یک روش دینامیکی است، تحلیل‌های غیرخطی با استفاده از یک حل کننده صریح برای کاهش مسائل همگرایی انجام می‌شود. روش تحلیل دینامیکی صریح برای داشتن یک تحلیل پایدار، بازه‌های زمانی کوچک زیادی را در نظر می‌گیرد. این روش از اپراتور تفاضل مرکزی صریح مشتق شده است. اپراتور تفاضل مرکزی صریح، معادله تعادل دینامیکی را در آغاز افزایش t برآورد می‌کند. برای پیشبرد مسیر حل، شتاب در زمان t، سرعت در زمان $t + \Delta t/2$ و جابه‌جایی در زمان $t + \Delta t$ محاسبه می‌شوند. نتایج به دست آمده از این شیوه زمانی صحیح و پایدار خواهد بود که Δt در نظر گرفته شده به اندازه کافی کوچک باشد تا بتواند روند تغییر سرعت و شتاب در گره‌ها را دنبال کند. بنابراین برای ایجاد شرایط پایداری از پارامتری با عنوان حد پایداری استفاده شده است. این پارامتر به معنی بالاترین فرکانس در سیستم تعریف می‌شود. به عبارت دیگر، حد پایداری با استفاده از رابطه (۵) زیر برآورد می‌شود [39]:

$$\Delta t \leq \frac{2}{\omega_{max}}\left(\sqrt{1+\xi^2}-\xi\right) \qquad (۵)$$

جدول ۳ مشخصات مکانیکی بتن آسیب دیده پلاستیک

پارامتر ویسکوزیته	k	σ_{bo}/σ_{co}	خروج از مرکزیت	زاویه اتساع	مصالح	نمونه شاهد
۰/۰۰۱	۰/۶۶۷	۱/۱۶	۰/۱	۳۰	بتن	قاب بتن مسلح
۰/۰۰۱	۰/۶۶۷	۱/۱۶	۰/۱	۳۰	بتن	میان‌قاب با بازشو و بدون بازشو
۰/۰۰۱	۰/۶۷	۱/۱۶	۰/۱	۱۰	آجر	

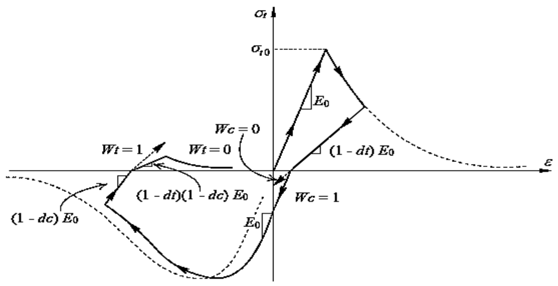
جدول ۴ مشخصات مکانیکی المان رابط و ملات قاب میان‌پر مصالح بنایی

رفتار مماسی	رفتار نرمال				رفتار چسبنده				نمونه شاهد
رفتار کشش-جداشدگی					خرابی				
					شروع خرابی		تکامل خرابی		
tan □		k_{tt} (N/mm^3)	k_{ss} (N/mm^3)	k_{nn} (N/mm^3)	$C=1.4f_t$ (N/mm^2)	f_t (N/mm^2)	G_f^{II} $(N.mm/mm^2)$	G_f^{I} $(N.mm/mm^2)$	
۰/۷۵	Hard	۵۰	۵۰	۱۱۰	۰/۲۲۴	۰/۱۶	۰/۰۵	۰/۰۱۲	SOLID

در رابطه بالا ξ به عنوان بخ شی از میرایی بحرانی در حالت بالاترین فرکانس است.

رفتار پلاستیک المان‌های آجری

مدل مواد پلاستیسیته آسیب دیده بتن (CDP) در آباکوس برای مدل‌سازی رفتار غیرخطی آجرها استفاده شد. این مدل مواد به طور خاص برای بتن نوشته شده است. با این حال، می‌توان از آن برای سایر مواد شکننده از جمله آجر استفاده کرد. این مدل فرض می‌کند که دو مکانیسم اصلی شکست برای مواد شکننده، ترک‌خوردگی کششی و خردشدگی فشاری است. در این مدل مواد، موقعیت سطح تسلیم همیشه به ترتیب توسط دو متغیر، کرنش پلاستیک کششی و فشاری کنترل می‌شود. همچنین این مدل قابل استفاده برای بارگذاری یک طرفه و رفت و برگشتی می‌باشد (شکل ۱۰) .



شکل ۱۰ رفتار بتن در بارگذاری تک‌محوره [41]

مقیاس‌سازی جرمی

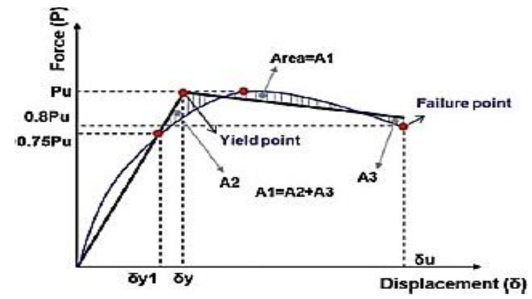
روش مقیاس‌سازی جرمی باعث می‌شود تحلیل مدل بدون افزایش نرخ بارگذاری در زمان کمتری انجام شود. همان طور که در بخش حل دینامیکی صریح اشاره شد حد پایداری مدل کوچک‌ترین نمو زمانی پایدار همه المان‌ها است و نمو زمانی پایدار خود وابسته به چگالی ماده را افزایش می‌دهد که منجر به افزایش نمو زمانی پایدار خواهد داشت. زمانی که نمو زمانی پایدار افزایش پیدا می‌کند و در مجموع به تعداد نموهای کمتری نیاز خواهد بود و این گونه زمان محاسباتی کاهش می‌یابد. در این مقاله برای مقیاس کردن مدل نرم‌افزاری از مقیاس جرمی ۰/۰۰۰۵ استفاده گردیده است.

روش دو خطی

منحنی‌های نیرو- جابه‌جایی برای نمونه‌های تحلیلی نقطه تسلیم مشخصی ندارند. ظرفیت شکل‌پذیری، همان طور که در شکل (۱۱) نشان داده شده است، با استفاده از یک روش تقریب دوخطی ایده‌آل پیشنهاد شده توسط Paulay و Priestley تعیین شد. ظرفیت شکل‌پذیری به عنوان نسبت جابه‌جایی نهایی (δ_U) به جابه‌جایی هنگام تسلیم (δ_y) محاسبه شد. با جابه‌جایی نهایی (δ_U)، که به عنوان مقدار جابه‌جایی مربوط به افت ۲۰ درصدی جابه‌جایی تسلیم نیرو حداکثر، (δ_y) تعیین می‌شود که با رسم خطی بین مبدأ و نقطه روی نیرو تعیین می‌شود. منحنی جابه‌جایی مربوط به اولین تسلیم آرماتور طولی تیر یا ۷۵ درصد نیروی نهایی، P_U، هر کدام کمتر بود، و سپس این خط را تا P_U رسم کنید. شاخه پس از تسلیم منحنی نیرو- جابه‌جایی ایده‌آل دوخطی با استفاده از یک روش گرافیکی تکراری رسم می‌شود به طوری که مناطق زیر و بالای منحنی دوخطی ایده‌آل برابر هستند. ظرفیت شکل‌پذیری و سختی مؤثر به ترتیب با استفاده از روابط (۶) و (۷) تعیین شد.

$$K_e = \frac{P_u}{\delta_y} \qquad (۶)$$

$$\mu = \frac{\delta_u}{\delta_y} \qquad (۷)$$



شکل ۱۱ دوخطی سازی نمودار نیرو-جابه‌جایی [44]

صحت‌سنجی

در مطالعه حاضر، به چگونگی رفتار قاب بتن مسلح غیر لرزه‌ای یک طبقه- یک دهانه و یک قاب بتن مسلح میان‌پر مصالح بنایی (آجری) ساخته شده که تحت بار جانبی یک طرفه داخل صفحه قرار گرفته، پرداخته شده است. از نمونه آزمایشگاهی منصوری و همکاران برای صحت‌سنجی استفاده شده است [31]. قاب RC با استفاده از تحلیل استاتیکی غیر خطی و قاب پر شده مصالح بنایی با تحلیل دینامیکی صریح و مدل‌سازی مزو مورد تحلیل قرار گرفت و نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شد. پس از آن، برای کالیبراسیون شبیه‌سازی عددی قاب‌های پر شده تحت

بارگذاری خارج از صفحه، از نمونه آزمایشی فورتادو استفاده شده است [13]. صحت‌سنجی شامل مقایسه حالت شکست و منحنی نیرو- جابه‌جایی نمونه‌های آزمایشی و مدل عددی مربوطه است.

صحت‌سنجی رفتار داخل صفحه

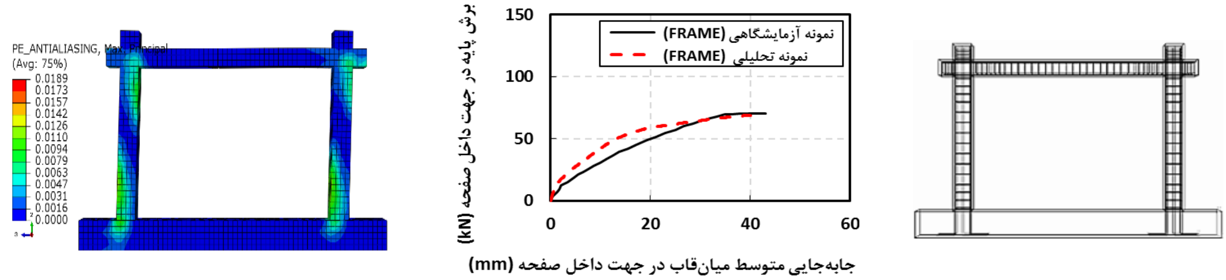
قاب بتن مسلح (RC) تحت بارگذاری یکنواخت داخل صفحه تا ۳ درصد رانش ادامه داشت. ابتدا مفصل پلاستیک در دو سر تیر و سپس در انتهای ستون‌ها ایجاد شد. نمونه‌های قاب با میان‌قاب مصالح بنایی (Solid) که تحت بارگذاری یکنواخت داخل صفحه قرار گرفتند تا ۴/۳ درصد رانش ادامه داشت. ایجاد شکاف در محل اتصال بین میان‌قاب مصالح بنایی و قاب مشاهده شد، که نشان دهنده تسلط حالت لغزشی در محل مرزهای ملات بر رفتار کلی میان‌قاب مصالح بنایی است. درصد اختلاف پارامترهای مقاومت نهایی، سختی مؤثر، شکل‌پذیری نمونه‌های تحلیلی و آزمایشگاهی در جدول (۵) و نمودار نیرو- جابه‌جایی آزمایشگاهی و تحلیلی در شکل (۱۲) نشان داده شده است.

صحت‌سنجی رفتار خارج از صفحه

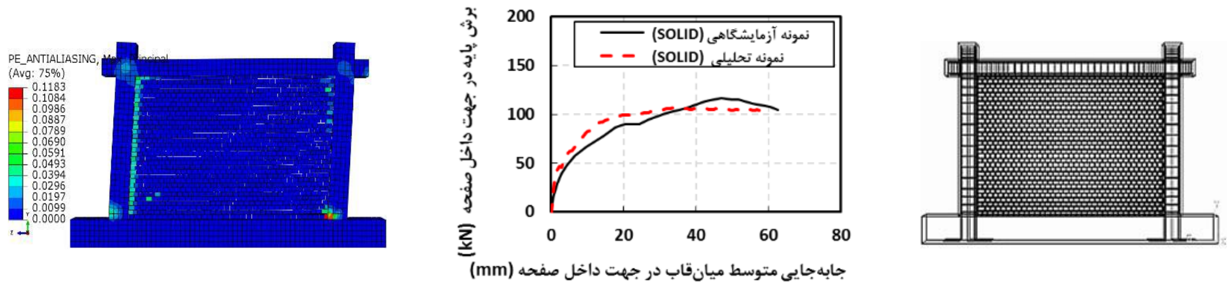
برای صحت‌سنجی بارگذاری خارج از صفحه از مدل آزمایشگاهی فورتادو استفاده شده است [13]. ترک‌های افقی، عمودی و مورب در درزهای ملات و در نقاط مختلف از جمله مرکز میان‌قاب ایجاد شد که نشان می‌دهد عملکرد قوس دو طرفه در میان‌قاب رخ داده است. مقایسه پارامترهای مورد بررسی شامل مقاومت و سختی مؤثر و شکل‌پذیری نمونه تحلیلی و آزمایشی در جدول (۵) نشان داده شده است. نمودار نیرو- جابه‌جایی نمونه تحلیلی و آزمایشگاهی در شکل (۱۳) مطابقت خوبی دارند.

نتایج و بحث

در این بخش، نتایج ارائه شده برای بررسی بیشتر اندرکنش داخل صفحه و خارج از صفحه مصالح بنایی با شرایط مرزی مختلف شرح داده شده است. اثر اندرکنش بر پاسخ لرزه‌ای میان‌قاب‌های مصالح بنایی، تحت سه نوع بارگذاری مورد تحلیل قرار گرفت. نمونه‌ها با استفاده از تحلیل استاتیکی غیرخطی یا به اصطلاح پوش اور مورد مطالعه تحلیلی قرار گرفته است. مدل‌ها و نتایج تحلیلی بر اساس منحنی‌های نیرو-جابه‌جایی ارائه و توصیف شده‌اند. مقاومت نهایی و سختی مؤثر نمونه‌ها را می‌توان بر اساس منحنی‌های دوخطی نیرو- جابه‌جایی تخمین زد.

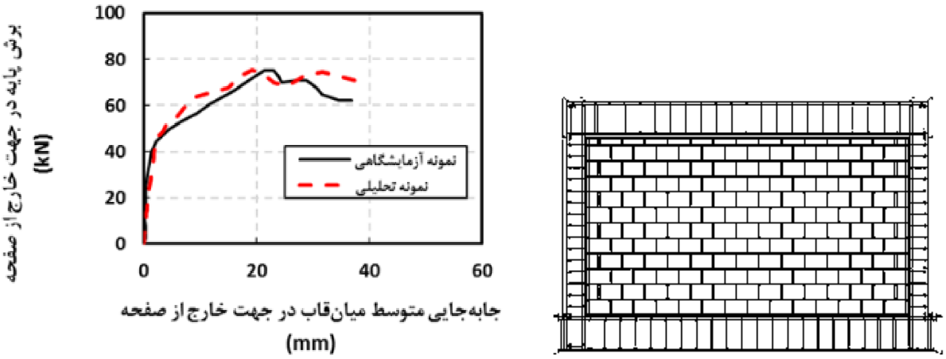


(الف) صحت‌سنجی قاب بتن مسلح



(ب) صحت‌سنجی قاب میان‌پر مصالح بنایی

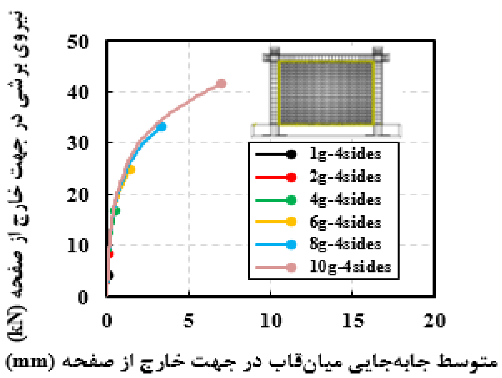
شکل ۱۲ مقایسه نمونه شاهد آزمایشگاهی با نمونه تحلیلی برای صحت‌سنجی بارگذاری داخل صفحه



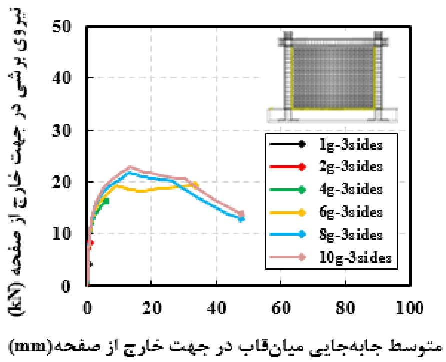
شکل ۱۳ مقایسه نمونه شاهد آزمایشگاهی با نمونه تحلیلی برای صحت‌سنجی بارگذاری خارج از صفحه

جدول ۵ مقایسه نمونه شاهد آزمایشگاهی با نمونه تحلیلی برای صحت‌سنجی

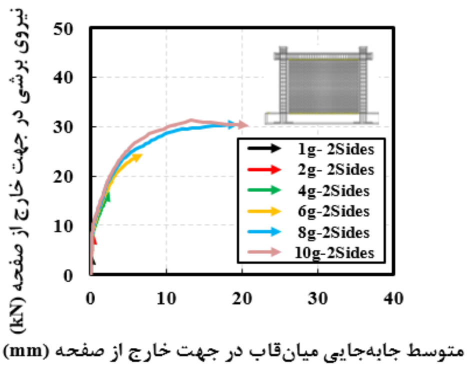
نمونه	نوع نمونه	مقاومت نهایی (kN)	سختی مؤثر (kN/mm)	شکل‌پذیری	سطح زیرنمودار (mm)	٪ اختلاف سطح زیر دو نمودار
SOLID	آزمایشگاهی	۱۱۵	۷/۲	۴/۱۶	۵۳۴۱/۸	٪ ۲/۹
	تحلیلی	۱۰۶	۹	۵	۵۵۶۸/۲	
فورتادو	آزمایشگاهی	۷۵	۶/۴۵	۳/۵۵	۲۲۸۱/۴۴	٪ ۱۱/۹
	تحلیلی	۷۵/۴	۶/۸۵	۳/۷۱	۲۵۵۴/۵	



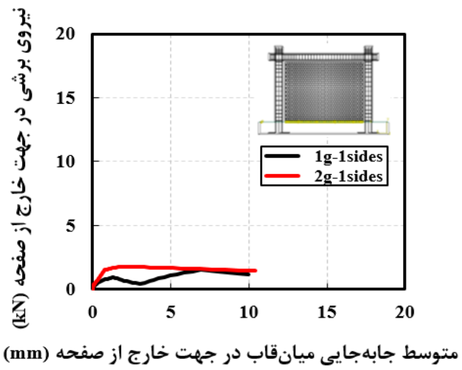
(الف) اتصال در چهار طرف



(ب) اتصال در سه طرف



(پ) اتصال در دو طرف



(ت) اتصال در یک طرف

شکل ۱۴ بارگذاری در جهت خارج از صفحه تنها در سطح شتاب‌های مختلف و اتصالات مختلف قاب میان‌پر مصالح بنایی

رفتار خارج از صفحه

بارگذاری خارج از صفحه بر روی تمام سطح میان‌قاب‌های مصالح بنایی با اتصالات مختلف برابر با شتاب زمین از (1g) تا (۱۰g) اعمال گردید. هیچ بار محوری در نظر گرفته نشده است. تیر پایین قاب به طور کامل مهار شده تا یک تیر فونداسیون صلب را شبیه‌سازی کند. منحنی‌های نیرو- جابه‌جایی در شکل (۱۴) نشان داده شده است. نمونه اول قاب میان‌پر از هر چهار طرف به قاب پیرامونی خود متصل است و هیچ درزی و انفصالی از قاب اطراف خود ندارد؛ در سطح شتاب (۱۰g) بیشترین مقاومت خارج از صفحه و جابه‌جایی در جهت خارج از صفحه را دارد (شکل ۱۴–الف). نمونه دوم دارای سه لبه اتصال به قاب پیرامون خود و لبه بالایی میان‌قاب به قاب اتصالی ندارد و دارای انفصال است که تا سطح شتاب (۴g) افزایش مقاومت دارد و از سطح شتاب (۶g) شکست می‌خورد و مقاومت آن کاهش پیدا می‌کند (شکل ۱۴–ب). نمونه سوم دو لبه افقی (بالا و پایین) میان‌قاب به قاب اطراف اتصال دارد و دو لبه قائم میان‌قاب دارای انفصال است و هیچ اتصالی به قاب اطراف ندارد، در این نمونه با افزایش سطح شتاب‌ها افزایش مقاومت داشت و از شتاب (۱۰g) مقاومت افت می‌کند، اما نسبت به نمونه دوم که از سه طرف اتصال دارد مقاومت بیشتری دارد، پس مقاومت نمونه‌ای که میان‌قاب از بالا و پایین اتصال دارد بیشتر است و مقاومت اتصال کناره‌ها ضعیف‌تر است (شکل ۱۴–پ). نمونه چهارم فقط در لبه پایینی به قاب متکی است و در سه لبه دیگر آزاد است، به طوری که در شتاب‌های (1g) هم مقاومت اندکی در جهت خارج از صفحه دارد و نمونه شکسته می‌شود (شکل ۱۴–ت).

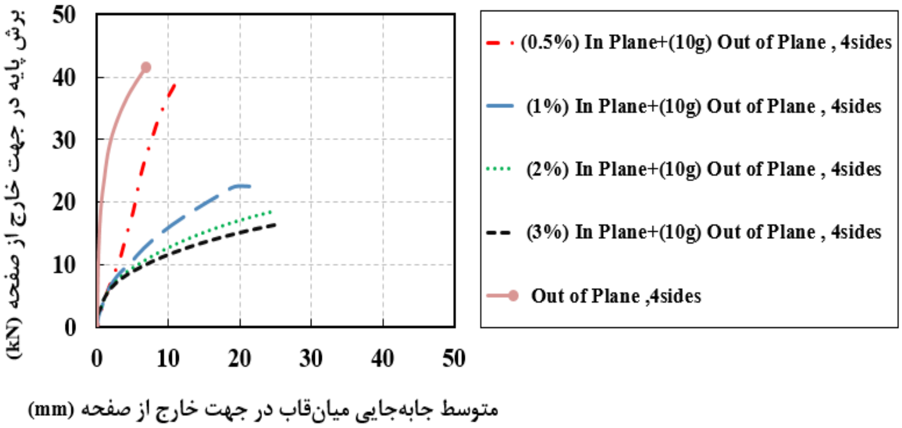
مقایسه کلی بین نمونه‌های تحلیلی نشان داده شده است، هر چه میان‌قاب مصالح بنایی از اطراف به قاب بتن مسلح اتصال داشته باشد، مقاومت و سختی مؤثر بالاتری نیز دارد، به طوری که در نمونه‌ای که از چهار طرف میان‌قاب مصالح بنایی با قاب اطراف اتصال دارد مقاومت، سختی مؤثر و شکل‌پذیری آن از دیگر نمونه‌های تحلیلی در سطح‌های مختلف شتاب بیشتر است. بعد از آن نمونه‌هایی که از بالا و پایین به قاب بتن مسلح اتصال دارد در جهت خارج از صفحه بیشترین مقاومت، سختی و شکل‌پذیری را دارد اما اگر بالای میان‌قاب اتصال نداشته باشد و در کناره و پایین آن نیز اتصال داشته باشد، مقاومت و سختی افت قابل توجهی را نشان می‌دهد. میان‌قاب اگر در یک جهت فقط اتصال داشته باشد، با سطح شتاب (1g) مقاومت و سختی مؤثر خود را از دست داده و فرو می‌ریزد. تغییر سختی فقط در شتاب‌های بسیار بالا اتفاق می‌افتد. دلیل این امر ناشی از این مسئله است که در شتاب‌های کوچک تغییر مکان میان‌قاب در جهت خارج از صفحه بسیار کوچک است، در واقع می‌توان گفت میان‌قاب که در تماس کامل با قاب پیرامون خود است به علت عملکرد قوسی دو طرفه در جهت خارج از صفحه خود بسیار پایدار می‌باشد.

بارگذاری خارج از صفحه پس از بارگذاری داخل صفحه

در این بخش، نمونه‌ها تحت بارگذاری داخل صفحه و سپس تحت بارگذاری خارج از صفحه مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. در مرحله داخل صفحه، قاب با سطح جابه‌جایی نسبی (به ترتیب ۰/۵٪، ۱٪، ۲٪ و ۳٪) بارگذاری شد. بعد از آن در طول مرحله خارج از صفحه، میان‌قاب آسیب دیده تحت فشار یکنواخت خارج از صفحه تا (۱۰g) بارگذاری گردید. در مرحله خارج از صفحه، قاب RC برای جابه‌جایی خارج از صفحه مهار شد. هیچ بار محوری در هر دو مرحله بارگذاری در نظر گرفته نشد. در هر دو مرحله، تیر پایین قاب به طور کامل مهار شد تا یک تیر پی صلب را شبیه‌سازی کند. پس از آن، تأثیر آسیب داخل صفحه بر رفتار خارج از صفحه بررسی می‌شود.

بررسی میان‌قاب مصالح بنایی با اتصال کامل از چهار طرف با قاب بتن مسلح. همان طور که شکل (۱۵) نشان داده شد، در نمونه‌های که قاب میان‌پر مصالح بنایی که در چهار طرف با قاب بتن مسلح اتصال دارد، زمانی که ابتدا بارگذاری داخل صفحه و بعد بارگذاری خارج از صفحه در نمونه انجام شد، سختی و مقاومت افت قابل توجهی کرد. حتی آسیب‌دیدگی‌ها در داخل صفحه با کاهش مقاومت و سختی ارتباط مستقیمی دارد. به طوری که مشاهده شد هر چه جابه‌جایی نسبی در داخل صفحه افزایش پیدا کند، ظرفیت میان‌قاب مصالح بنایی در خارج از صفحه کاهش پیدا می‌کند. با توجه به نتایج دو خطی در جدول (۶) نمونه با جابه‌جایی نسبی ۰/۵٪ مقاومت نهایی و سختی نمونه

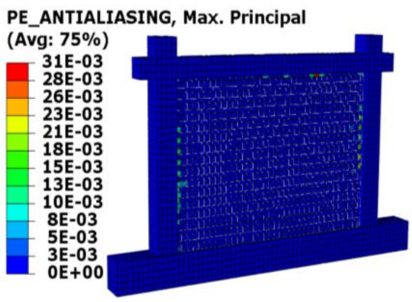
به ترتیب ۹٪ و ۶۴٪ نسبت به نمونه بدون آسیب‌دیدگی در داخل صفحه کاهش پیدا می‌کند. نمونه با جابه‌جایی نسبی ۱٪ مقاومت نهایی و سختی نمونه به ترتیب ۴۶٪ و ۸۶٪ نسبت به نمونه بدون آسیب‌دیدگی در داخل صفحه کاهش پیدا می‌کند. نمونه با جابه‌جایی نسبی ۲٪ مقاومت نهایی و سختی نمونه به ترتیب ۵۵٪ و ۹۰٪ نسبت به نمونه بدون آسیب‌دیدگی در داخل صفحه کاهش پیدا می‌کند. نمونه با جابه‌جایی نسبی ۳٪ مقاومت نهایی و سختی نمونه به ترتیب۶۰٪ و ۹۱٪ نسبت به نمونه بدون آسیب‌دیدگی در داخل صفحه کاهش پیدا می‌کند، تغییر شکل‌های پلاستیک نمونه‌های مورد نظر در شکل (۱۶) نشان داده شده است.



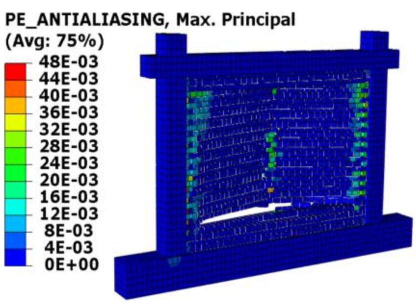
شکل ۱۵ تأثیر آسیب‌دیدگی داخل صفحه با جابه‌جایی‌های نسبی مختلف بر مقاومت خارج از صفحه نمونه چهار طرف اتصال

جدول ۶ نتایج دو خطی نمونه با چهار طرف اتصال دارای سطح شتاب (۱۰g) در جابه‌جایی نسبی مختلف

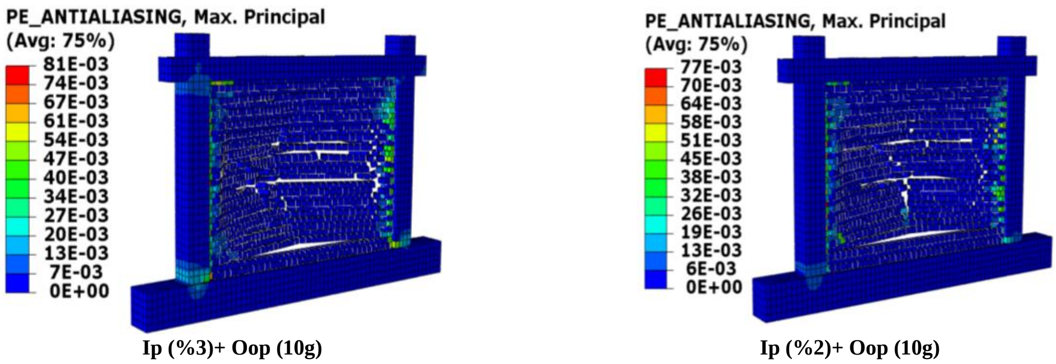
نمونه قاب میان‌پر با چهار طرف اتصال	مقاومت نهایی (kN)	سختی مؤثر (kN/mm)
خارج از صفحه (۱۰g)	۴۱/۶	۱۱
داخل صفحه (۰/۵٪) + خارج از صفحه (۱۰g)	۴۱	۴
داخل صفحه (۱٪) + خارج از صفحه (۱۰g)	۲۲/۵	۱/۷۵
داخل صفحه (۲٪) + خارج از صفحه (۱۰g)	۱۸/۵	۱/۱۵
داخل صفحه (۳٪) + خارج از صفحه (۱۰g)	۱۶/۵	۱



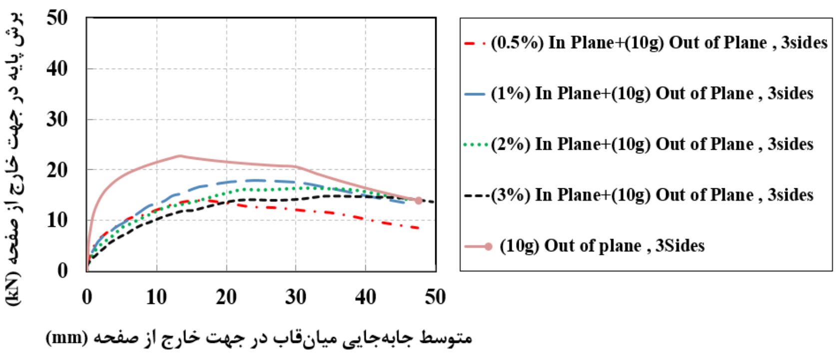
Ip (%0.5)+ Oop (10g)



Ip (%1)+ Oop (10g)



شکل ۱۶ تغییر شکل‌های پلاستیک و آسیب‌های نمونه قاب میان‌پر در چهار طرف اتصال

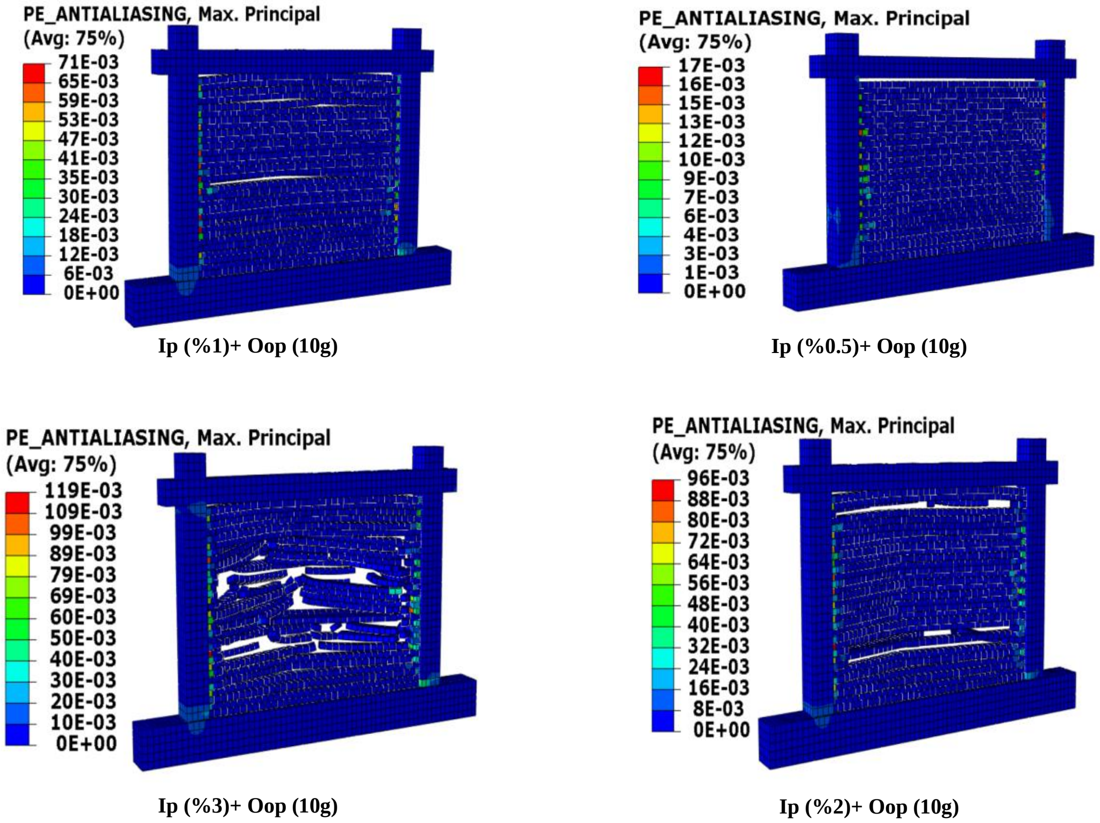


شکل ۱۷ تأثیر آسیب‌دیدگی داخل صفحه با جابه‌جایی نسبی مختلف بر مقاومت خارج از صفحه میان‌قاب با سه طرف اتصال

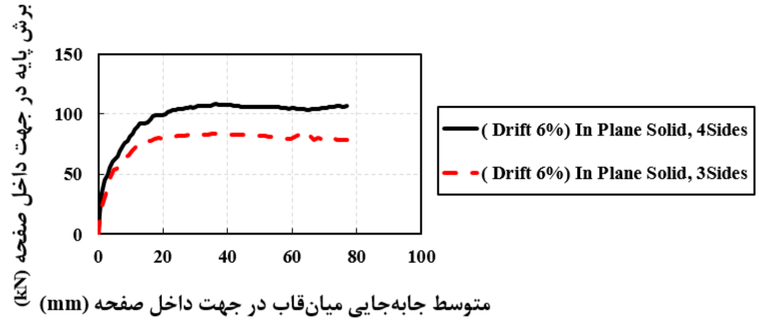
بررسی میان‌قاب مصالح بنایی با سه طرف اتصال با قاب بتن مسلح. برای بررسی آسیب‌دیدگی میان‌قاب در اثر جابه‌جایی داخل صفحه و تأثیر آن در ظرفیت خارج از صفحه، چهار سطح جابه‌جایی نسبی ۰/۵٪، ۱٪ ، ۲٪ و ۳٪ بر روی سازه در نظر گرفته شد. ابتدا قاب بتن مسلح دارای میان‌قاب مصالح بنایی که از سه طرف اتصال دارد در جهت داخل صفحه پوش داده شد، سپس بارگذاری در جهت خارج از صفحه در سطح شتاب‌های مختلف از (1g) تا (10g) با تحلیل استاتیکی غیر خطی روی میان‌قاب‌های مصالح بنایی انجام شد. در شکل (۱۷) مشاهده می‌شود در سطح شتاب (10g) در حالتی که جابه‌جایی نسبی داخل صفحه ۰/۵٪ است. نسبت به نمونه‌ای که جابه‌جایی نسبی داخل صفحه ۳٪ است در ابتدا سختی با افت بیشتری مواجه می‌شود. علت آن این است که جابه‌جایی نسبی داخل صفحه ۰/۵٪ باعث پر شدن فضای بین میان‌قاب مصالح بنایی و قاب بتن مسلح نمی‌شود، پس سختی آن از نمونه‌ای که جابه‌جایی نسبی ۳٪ دارد کمتر است. حالتی که نمونه دارای جابه‌جایی نسبی داخل صفحه ۳٪ به علت افزایش حجم میان‌قاب مصالح بنایی به قاب پیرامونی خود می‌چسبد، در این حالت سختی نمونه مورد نظر افزایش پیدا می‌کند. با توجه به نتایج دو خطی در جدول (۷) نمونه با جابه‌جایی نسبی ۰/۵٪ مقاومت نهایی و سختی نمونه به ترتیب ۴۲٪ و ۶۸٪ نسبت به نمونه بدون آسیب‌دیدگی در داخل صفحه کاهش پیدا می‌کند. نمونه با جابه‌جایی نسبی ۱٪ مقاومت نهایی و سختی نمونه به ترتیب ۲۵٪ و ۷۱٪ نسبت به نمونه بدون آسیب‌دیدگی در داخل صفحه کاهش پیدا می‌کند. نمونه با جابه‌جایی نسبی ۲٪ مقاومت نهایی و سختی نمونه به ترتیب ۳۴٪ و ۷۶٪ نسبت به نمونه بدون آسیب‌دیدگی در داخل صفحه کاهش پیدا می‌کند. نمونه با جابه‌جایی نسبی ۳٪ مقاومت نهایی و سختی نمونه به ترتیب ۴۲٪ و ۷۷٪ نسبت به نمونه بدون آسیب‌دیدگی در داخل صفحه کاهش پیدا می‌کند. وجود فاصله بین قاب و میان‌قاب اثر قابل ملاحظه‌ای در رفتار داخل صفحه و خارج از صفحه میان‌قاب دارد. تغییر شکل‌های پلاستیک نمونه‌های مورد نظر در شکل (۱۸) نشان داده شده است.

جدول ۷ نتایج دو خطی نمونه با سه طرف اتصال دارای سطح شتاب (۱۰g) در جابه‌جایی نسبی مختلف

نمونه قاب میان‌پر با سه طرف اتصال	مقاومت نهایی (kN)	سختی مؤثر (kN/mm)
خارج از صفحه (۱۰g)	۲۴	۴/۳۶
داخل صفحه (۰/۵٪) + خارج از صفحه (۱۰g)	۱۴	۱/۴
داخل صفحه (۱٪) + خارج از صفحه (۱۰g)	۱۸	۱/۲۸
داخل صفحه (۲٪) + خارج از صفحه (۱۰g)	۱۶	۱/۰۶
داخل صفحه (۳٪) + خارج از صفحه (۱۰g)	۱۵	۱



شکل ۱۸ تغییر شکل‌های پلاستیک و آسیب‌های نمونه قاب میان‌پر در سه جهت اتصال در بارگذاری خارج از صفحه

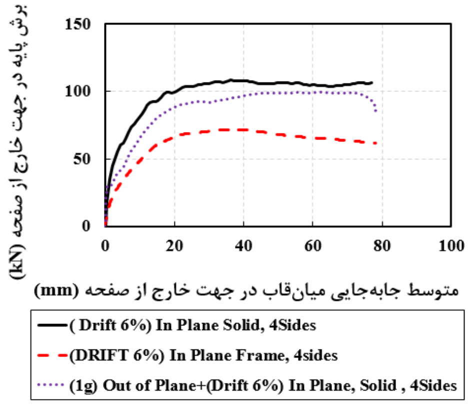


شکل ۱۹ مقایسه منحنی نیرو–جابه‌جایی داخل صفحه در قاب سه و چهار طرف اتصال

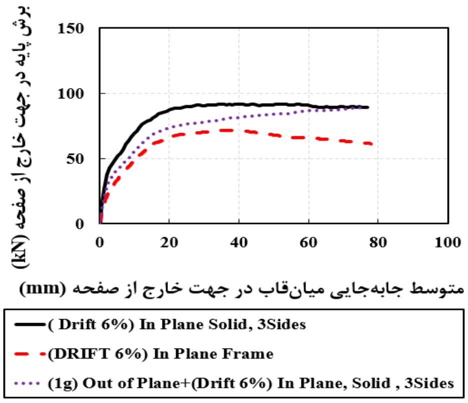
مقایسه میان‌قاب مصالح بنایی با سه طرف و چهار طرف اتصال با قاب بتن مسلح. نمونه‌هایی که قاب میان‌پر مصالح بنایی که در سه طرف با قاب بتن مسلح اتصال دارد و میان‌قاب به فاصله یک آجر از بالای تیر قاب بتن مسلح فاصله دارد؛ ابتدا تحت اثر بارگذاری داخل صفحه تا رانش ۶٪ بررسی گردید. شکل (۱۹) نشان می‌دهد زمانی که میان‌قاب در بارگذاری داخل صفحه در سه جهت اتصال دارد، مقاومت نهایی، سختی مؤثر به ترتیب ۱۸٪ و ۳۳٪ نسبت به نمونه دارای چهار جهت اتصال دارد، کاهش می‌یابد. در حالتی که میان‌قاب از چهار طرف اتصال دارد عمکرد قوسی دو طرفه اتفاق می‌افتد اما زمانی که میان‌قاب مصالح بنایی از سه طرف با قاب اطراف در ارتباط است در جابه‌جایی‌های زیاد خارج از صفحه به علت افزایش حجم میان‌قاب در اثر افزایش بارگذاری خارج از صفحه، میان‌قاب به تیر بالایی می‌چسبد و عمل قوسی دو طرفه در آن شکل می‌گیرد. لذا مقاومت خارج از صفحه میان‌قاب در این حالت دچار تغییر زیادی نمی‌شود.

بارگذاری داخل صفحه پس از بارگذاری خارج از صفحه

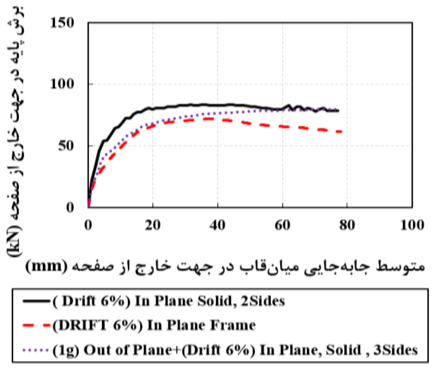
در این بخش، نمونه‌ها تحت بارگذاری خارج از صفحه و سپس تحت بارگذاری داخل صفحه مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. در طول مرحله خارج از صفحه، مدل تحت فشار یکنواخت خارج از صفحه تا (1g) تحلیل شد. در مرحله داخل صفحه، قاب با سطح جابه‌جایی نسبی ۶٪ اعمال و تحلیل شد. در هر دو مرحله، تیر پایین قاب به طور کامل مهار شد تا یک تیر پی صلب را شبیه‌سازی کند. میزان کاهش مقاومت و اثربخشی با ظرفیت بارگذاری داخل صفحه اندازه‌گیری شد. پس از آن، تأثیر آسیب‌های خارج از صفحه بر رفتار داخل صفحه با مقایسه منحنی‌های نیرو- جابه‌جایی بررسی شد. همان طور که در شکل (۲۰) مشاهده می‌گردد، میان‌قاب زمانی که در جهت خارج از صفحه بارگذاری می‌شود وارد محدوده غیر خطی شده و زمانی که در خارج از صفحه دچار آسیب می‌شود در داخل صفحه افت شدید مقاومت و سختی را تجربه می‌کند. با توجه به نتایج دو خطی نمونه‌ها در جدول (۸) زمانی که قاب میان‌پر مصالح بنایی در چهار طرف اتصال دارد، مقاومت نهایی، سختی مؤثر و شکل‌پذیری به ترتیب ۶٪ ، ۲۵٪ ،۲۰٪ نسبت به نمونه‌ای که در خارج از صفحه دچار آسیب نشده است و فقط بارگذاری در جهت داخل صفحه شده است، کاهش می‌یابد. اگر قاب میان‌پر مصالح بنایی از سه طرف اتصال داشته باشد، مقاومت نهایی، سختی مؤثر، شکل‌پذیری به ترتیب ۱۳٪، ۳۳٪ ، ۲۴٪ نسبت به نمونه‌ای که در خارج از صفحه دچار آسیب نشده است، کاهش پیدا می‌کند. اگر قاب میان‌پر مصالح بنایی از دو طرف اتصال داشته باشد، (از بالا و پایین میان‌قاب مصالح بنایی)، مقاومت نهایی، سختی مؤثر، شکل‌پذیری به ترتیب ۱۱/۵٪ ،۴۰٪ ، ۳۵٪ نسبت به نمونه‌ای که در جهت خارج از صفحه آسیب ندیده، کاهش پیدا کرده است. زمانی که میان‌قاب مصالح بنایی از یک طرف اتصال داشته باشد، مقاومت نهایی، سختی مؤثر، شکل‌پذیری به ترتیب ۱۳/۷۵٪ ،۳۰٪ ، ۱۹/۸٪ نسبت به نمونه‌ای که در جهت خارج از صفحه آسیب ندیده، کاهش پیدا کرده است. تغییر شکل‌های پلاستیک نمونه‌ها در بارگذاری داخل صفحه با تأثیر بارگذاری خارج از صفحه در شکل (۲۱) نشان داده شده است.



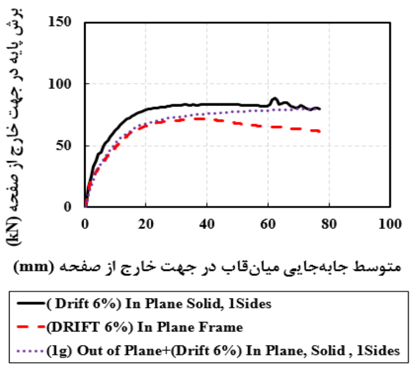
(الف) چهار طرف اتصال



(ب) سه طرف اتصال

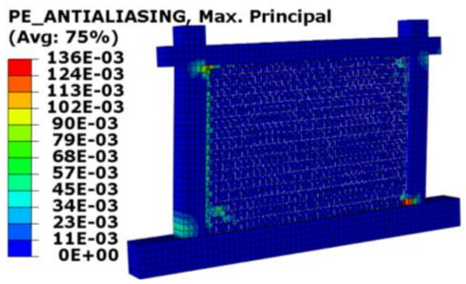


(پ) دو طرف اتصال

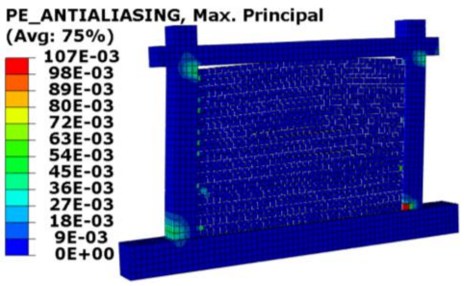


(ت) یک طرف اتصال

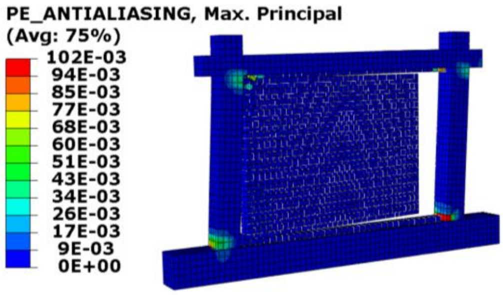
شکل ۲۰ منحنی نیرو–جابه‌جایی داخل صفحه برای قاب‌های آسیب دیده در سطح شتاب (۱۰g) در جهت خارج از صفحه



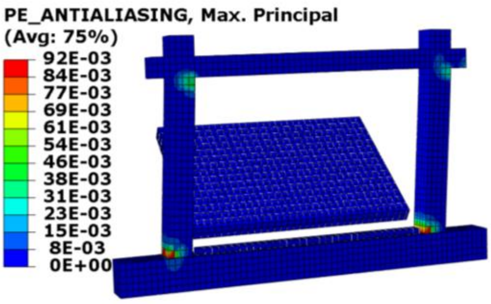
(الف) چهار طرف اتصال



(ب) سه طرف اتصال



(پ) دو طرف اتصال



(ت) یک طرف اتصال

شکل ۲۱ تغییر شکل‌های پلاستیک قاب با میان‌قاب مصالح بنایی در بارگذاری داخل صفحه و تأثیر آسیب خارج از صفحه

جدول ۸ نتایج دو خطی نمونه‌های بارگذاری شده با اتصالات مختلف

نوع اتصال قاب و میان‌قاب	نوع بارگذاری	مقاومت نهایی (kN)	سختی مؤثر (kN/mm)	شکل‌پذیری
چهار طرف اتصال	داخل صفحه (۶٪)	۱۰۱	۸/۸	۶/۷
	خارج از صفحه (1g) + داخل صفحه (۶٪)	۹۵	۶/۵۷	۵/۳۴
سه طرف اتصال	داخل صفحه (۶٪)	۸۶	۷/۱	۶/۴
	خارج از صفحه (1g) + داخل صفحه (۶٪)	۷۴	۴/۷۵	۵
دو طرف اتصال	داخل صفحه (۶٪)	۸۱	۶/۷۵	۶/۴
	خارج از صفحه (1g) + داخل صفحه (۶٪)	۷۰	۴/۶	۵
یک طرف اتصال	داخل صفحه (۶٪)	۸۰	۶/۱۵	۵/۹۲
	خارج از صفحه (1g) + داخل صفحه (۶٪)	۶۹	۴/۳	۴/۷۵

نتیجه‌گیری

در این مقاله با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس، قاب با میان‌قاب مصالح بنایی با شرایط مرزی مختلف تحت سه نوع بارگذاری شامل: ۱) بارگذاری خارج از صفحه، ۲) بارگذاری خارج از صفحه بعد از بارگذاری داخل صفحه، ۳) بارگذاری داخل صفحه بعد از بارگذاری خارج از صفحه مورد بررسی قرار گرفته‌اند. نتایج حاصل عبارتند از:

۱. میان‌قاب مصالح بنایی که از چهار طرف اتصال دارد، نسبت به میان‌قاب مصالح بنایی که از سه طرف اتصال دارد، در بارگذاری خارج از صفحه حدود ۵۰٪ مقاومت بالاتری دارد.
۲. تغییر سختی میان‌قاب‌های مصالح بنایی در شتاب‌های بسیار بالا اتفاق می‌افتد، زیرا در شتاب‌های بسیار پایین تغییر مکان میان‌قاب در جهت خارج از صفحه اتفاق نمی‌افتد.
۳. با بررسی تأثیر آسیب‌های داخل صفحه بر بارگذاری خارج از صفحه، مشاهده شد هر چه جابه‌جایی نسبی بیشتر شود ظرفیت خارج از صفحه افت بیشتری می‌کند. به طوری که کاهش سختی با آسیب‌های داخل صفحه ارتباط مستقیمی دارد. به طوری که در میان‌قاب مصالح بنایی که از چهار طرف به میان‌قاب اتصال دارد، حدود ۳۰٪ از جابه‌جایی نسبی ۰/۵٪ تا ۳٪ کاهش سختی دیده شد.
۴. در بررسی آسیب داخل صفحه در بارگذاری خارج از صفحه میان‌قاب‌های مصالح بنایی که با قاب از سه طرف اتصال دارند هنگامی که جابه‌جایی نسبی داخل صفحه ۰/۵٪ است نسبت به نمونه‌ای که جابه‌جایی نسبی داخل صفحه ۳٪ است، سختی با افت بیشتری مواجه می شود. به علت اینکه نمونه دارای جابه‌جایی نسبی داخل صفحه ۳٪، با افزایش حجم میان‌قاب به قاب پیرامونی خود می‌چسبد در این حالت سختی نمونه مورد نظر افزایش پیدا می‌کند.
۵. در بررسی آسیب خارج از صفحه در بارگذاری داخل صفحه در اتصالات مختلف میان‌قاب مصالح بنایی به قاب بتن مسلح، در چهار نوع اتصال افت مقاومت و سختی مشاهده گردید اما کمترین افت مقاومت و سختی را نمونه با چهار طرف اتصال مشاهده شد.
۶. قاب میان‌پر مصالح بنایی در اتصالات مختلف در بررسی آسیب خارج از صفحه در بارگذاری داخل صفحه بیشترین کاهش سختی را نمونه با اتصال یک‌طرفه داشته است که در حدود ۴۰٪ محاسبه گردید.

نشانه‌ها و علائم

E	مدول الاستیسیته مصالح بنایی، (N/mm^2)
f_t	مقاومت کششی درز ملات،(N/mm^2)
G_f^I	انرژی شکست در کشش، ($N.mm/mm^2$)
G_f^{II}	انرژی شکست در برش، ($N.mm/mm^2$)
c	مقاومت برشی
E_u	مدول الاستیسیته واحد مصالح بنایی
G_u	مدول برشی واحد مصالح بنایی
h_u	ارتفاع واحد مصالح بنایی
σ_{bo}	تنش فشاری دو محوره
Δt	حد پایداری
k_{ss}	سختی ملات در جهت برشی محور۱،(N/mm^3)
k_{tt}	سختی ملات در جهت برشی محور ۲،(N/mm^3)
k_{nn}	سختی ملات در جهت عمودی (کششی)،(N/mm^3)
ν	ضریب پواسون
Ø	ضریب اصطکاک
K	سختی المان رابط
E_m	مدول الاستیسیته ملات
G_m	مدول الاستیسیته ملات
h_m	ارتفاع ملات
σ_{co}	تنش فشاری تک‌محوره
P_U	مقاومت نهایی
δ_y	جابه‌جایی تسلیم
δ_u	جابه‌جایی نهایی
K_e	سختی مؤثر
μ	شکل‌پذیری
IP	In Plane
Oop	Out of Plane

واژه نامه

نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس	ABAQUS Finite Element Software

نرم‌افزار اجزای محدود دیانا	DIANA Finite Element Software	حرکت‌شناسی	Kinematic
مدل مواد پلاستیسیته آسیب دیده بتن	Concrete Damage Plasticity	مقیاس‌سازی جرمی	Mass Scaling
تحلیل دینامیکی ضمنی	Analysis Implicit Dynamic	مدل‌سازی ماکرو	Macro Modeling
تحلیل دینامیکی صریح	Dynamic Explicit Analysis	مدل‌سازی میکرو	Micro Modeling
رفتار چسبنده مبتنی بر سطح	Surface based cohesive behavior	مدل‌سازی مزو	Messo Modeling
زاویه اتساع	Dilation Angle	تماس سخت	Hard contact
خروج از مرکزیت	Eccentricity	پارامتر ویسکوزیته	Viscosity Parameter

سپاسگزاری

مراجع

[1] M. A. Najafgholipour, M. R. Maheri, P. B. Lourenço, “Capacity interaction in brick masonry under simultaneous in-plane and out-of-plane loads,” *Construction and building materials*, vol. 38, pp. 619-626, (2013).

[2] P. G. Asteris, L. Cavaleri, F. Di Trapani, A. K. Tsaris, “Numerical modelling of out-of-plane response of infilled frames: State of the art and future challenges for the equivalent strut macromodels,” *Engineering Structures*, vol. 132, pp. 110-122, (2017).

[3] S. Kadysiewski and K. M. Mosalam, “Modeling of unreinforced masonry infill walls considering in-plane and out-of-plane interaction,” *Pacific Earthquake Engineering Research Center*, Berkeley, (2009).

[4] J. Dawe and C. Seah, “Out-of-plane resistance of concrete masonry infilled panels,” *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 16, no. 6, pp. 854-864, (1989).

[5] P. Carydis, H. Mouzakis, J. Taflambas, and E. Vougioukas, “Response of infilled frames with brickwalls to earthquake motions,” *Proceedings of the 10th World Conference on Earthquake Engineering*, pp. 2829-2834, (1992).

[6] R. Angel, D. Abrams, D. Shapiro, J. Uzarski, M. Webster, “Behavior of reinforced concrete frames with masonry infills,” Civil Engineering Studies SRS-589, (1994).

[7] P. Negro and C. Taylor, “Effect of infills on the global seismic behaviour of R/C frames: results of pseudodynamic and shaking table tests,” *in Proceedings of the 11th World Conference on Earthquake Engineering*, Pergamon, Jun, pp. 23-28, (1996).

[8] A. Dafnis, H. Kolsch, H- G. Reimerdes, “Arching in masonry walls subjected to earthquake motions,” *Journal of Structural Engineering*, vol. 128, no. 2, pp. 153-159, (2002).

[9] B. Ng andu, D. R. W. Martens, A. T. Vermeltfoort, “The contribution of CASIEL infill walls to the shear resistance of steel frames,” *HERON-ENGLISH EDITION-*, vol. 51, no. 4, p. 201, (2006).

[10] A. Tasnimi and E. Zomorodi, “The effect of onplane behavior on inplane interaction of URM infilled RC frame under lateral loads,” *14 th European Conference on Earthquake Engineering*, (2010).

[11] S. Komaraneni, D. C. Rai, V. Singhal, "Seismic behavior of framed masonry panels with prior damage when subjected to out-of-plane loading," *Earthquake Spectra*, vol. 27, no. 4, pp. 1077-1103, (2011).

[12] K. M. Dolatshahi, A. J. Aref, *Computational, analytical and experimental modeling of masonry structures*. University of at Buffalo the State University of New York, (2012).

[13] A. Furtado, H. Rodrigues, A. Arêde, H. Varum, "Experimental characterization of the in-plane and out-of-plane behaviour of infill masonry walls," *Procedia Engineering*, vol. 114, pp. 862-869, (2015).

[14] M. Liu, Y. Cheng, and X. Liu, "Shaking table test on out-of-plane stability of infill masonry wall," *Transactions of Tianjin University*, vol. 17, no. 2, pp. 125-131, (2011).

[15] O. Rabinovitch and H. Madah, "Finite element modeling and shake-table testing of unidirectional infill masonry walls under out-of-plane dynamic loads," *Engineering Structures*, vol. 33, no. 9, pp. 2683-2696, (2011).

[16] M. F. P. Pereira, M. Pereira, J. Ferreira, and P. B. Lourenço, "Behavior of masonry infill panels in RC frames subjected to in plane and out of plane loads," (2011).

[17] S. Hak, P. Morandi, and G. Magenes, "Out-of-plane experimental response of strong masonry infills," *in 2nd European conference on earthquake engineering and seismology*, vol. 1, (2014).

[18] F. Akhoundi, G. Vasconcelos, P. B. Lourenço, C. A. O. F. Palha, and A. Martins, "Out-of-plane behavior of masonry infill walls," (2015).

[19] F. Akhoundi, G. Vasconcelos, P. Lourenço, and L. Silva, "Out-of-plane response of masonry infilled RC frames: Effect of workmanship and opening," *in Brick and Block Masonry:* pp. 1147-1154, (2016).

[20] F. Akhoundi, G. Vasconcelos, P. Lourenço, "Experimental out-of-plane behavior of brick masonry infilled frames," International Journal of Architectural Heritage, vol. 14, no. 2, pp. 221-237, (2020).

[21] I. S. Misir, O. Ozcelik, S. C. Girgin, U. Yucel, "The behavior of infill walls in RC frames under combined bidirectional loading," *Journal of Earthquake Engineering*, vol. 20, no. 4, pp. 559-586, (2016).

[22] C. Wang, "Experimental investigation on the out-of-plane behaviour of concrete masonry infilled frames," (2017).

[23] F. Anić, D. Penava, L. Abrahamczyk, and V. Sarhosis, "A review of experimental and analytical studies on the out-of-plane behaviour of masonry infilled frames," *Bulletin of Earthquake Engineering*, vol. 18, no. 5, pp. 2191-2246, (2020).

[24] M. Di Domenico, M. T. De Risi, P. Ricci, G. M. Verderame, G. Manfredi, "Empirical prediction of the in-plane/out-of-plane interaction effects in clay brick unreinforced masonry infill walls," *Engineering Structures*, vol. 227, p. 111438, (2021).

[25] S. Timoshenko and S. Woinowsky-Krieger, Theory of plates and shells. McGraw-hill New York, Vol. 2, pp. 240-246, (1959).

[26] A. W. Hendry, "The lateral strength of unreinforced brickwork," *The Structural Engineers* , (1973).

[27] A. Hendry and A. Kheir, "The lateral strength of certain brickwork panels," *Proceedings of the Fourth International Brick Masonry Conference*, p. 4. (1976).

[28] B. A. Haseltine, "Design of laterally loaded wall panels," (1975).

[29] E. L. McDowell, K. E. McKee,E. Sevin, “Arching action theory of masonry walls,” *Journal of the Structural Division*, vol. 82, no. 2, pp. 915-1-915-18, (1956).

[30] FEMA 356 F E.“Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings,” *Federal Emergency Management Agency*: Washington, DC, USA, (2000).

[31] A. Mansouri, M. S. Marefat, M. Khanmohammadi, “Experimental evaluation of seismic performance of low-shear strength masonry infills with openings in reinforced concrete frames with deficient seismic details,” *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, vol. 23, no. 15, pp. 1190-1210, (2014).

[32] K. M. Dolatshahi and M. Yekrangnia, “Out-of-plane strength reduction of unreinforced masonry walls because of in-plane damages,” *Earthquake Engineering Structural Dynamics*, vol. 44, no. 13, pp. 2157-2176, (2015).

[33] B. Pantò, I. Caliò, P. B. Lourenço, “A 3D discrete macro-element for modelling the out-of-plane behaviour of infilled frame structures,” *Engineering Structures*, vol. 175, pp. 371-385, (2018).

[34] P. Laurenco, J. G. Rots, and J. Blaauwendraad, “Two approaches for the analysis of masonry structures: micro and macro-modeling,” *HERON*, vol. 40, no. 4, (1995).

[35] A. J. Aref and K. M. Dolatshahi, “A three-dimensional cyclic meso-scale numerical procedure for simulation of unreinforced masonry structures,” *Computers & Structures*, vol. 120, pp. 9-23, (2013).

[36] D. S. Dugdale, “Yielding of steel sheets containing slits,” *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, vol. 8, no. 2, pp. 100-104, (1960).

[37] G. I. Barenblatt, “The mathematical theory of equilibrium cracks in brittle fracture,” *Advances in applied mechanics*, vol. 7, pp. 55-129, (1962).

[38] C. H. Zhai, J. C. Kong, X. H. Wang, “A finite element model for simulating out-of-plane behavior of masonry infilled RC frames,” *Applied Mechanics and Materials*, vol. 166, pp. 849-852, (2012).

[39] K. M. Dolatshahi, A. J. Aref, M. Yekrangnia, “Bidirectional behavior of unreinforced masonry walls,” *Earthquake Engineering Structural Dynamics*, vol. 43, no. 15, pp. 2377-2397, (2014).

[40] P. Lourenco, “Computational strategies for masonry structures//Ph. D. Thesis. Delft University of Technology. Delft. The Netherlands, (1996).

[41] I. ABAQUS, “ABAQUS Theory User Manual,” ed: Version, (2014).

[42] A. Committee, “Building code requirements for structural concrete (ACI 318-08) and commentary,” *American Concrete Institute*, (2008).

[43] P. B. Lourenço, “A user/programmer guide for the micro-modeling of masonry structures” vol. 3, no. 1.31, p. 35, (1996).

[44] J. Shafaei, A. Hosseini, and M. S. Marefat, “Seismic retrofit of external RC beam–column joints by joint enlargement using prestressed steel angles,” *Engineering Structures*, vol. 81, pp. 265-288, (2014).